



M 2017

ACÚSTICA DE INFANTÁRIOS - CASO DE ESTUDO: ASSOCIAÇÃO INFANTÁRIO E JARDIM DE INFÂNCIA CAROLINA MICHAËLIS

PEDRO FILIPE JESUS MOREIRA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
MIEC – MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ACÚSTICA DE INFANTÁRIOS – CASO DE ESTUDO: ASSOCIAÇÃO INFANTÁRIO E JARDIM DE INFÂNCIA CAROLINA MICHAËLIS

PEDRO FILIPE JESUS MOREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família e amigos

I have no idols. I admire work, dedication and competence.

Ayrton Senna.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, queria deixar uma palavra de agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a realização do mesmo, com especial apreço:

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela orientação, dúvidas esclarecidas e acima de tudo, paciência ao longo dos meses.

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa pelo apoio prestado durante as medições, pela sua simpatia e conselhos fornecidos ao longo do trabalho.

A todo o pessoal afeto à Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis, em especial à Presidente Mafalda Strecht e ao Vice-Presidente Paulo Vasconcelos pelo fornecimento de toda a documentação necessária à realização do trabalho, pela cedência do espaço, disponibilidade e simpatia.

À minha família, em especial aos meus pais pelo voto de confiança dado e sobretudo à minha irmã Marina e ao meu cunhado Rafael, pelos sacrifícios feitos ao longo destes 6 anos, pela paciência, boa disposição e principalmente pelo exemplo que são.

Aos meus amigos, em especial à minha amiga Fatinha e Olga pelas palavras de motivação e bons momentos passados.

RESUMO

Os locais destinados à permanência de crianças, pela sua função e público-alvo, tornam-se exigentes do ponto de vista acústico, não só por exigências regulamentares, mas também pela influência que provocam nos utilizadores. A ausência de adequadas condições acústicas nos locais afeta diretamente os utilizadores, tendo, no que se refere a crianças, consequências na concentração, desenvolvimento cognitivo ao nível da compreensão linguística e leitura. Também o pessoal técnico afeto pode sentir o seu rendimento profissional comprometido devido aos fatores ambientes.

A caracterização acústica deste tipo de locais torna-se essencial para uma correta avaliação dos espaços e correção acústica dos mesmos. É importante o estudo preliminar das condições ambiente, como o ruído de equipamentos, ruído exterior e ruído de fundo; dos envolventes e respetivos sistemas construtivos; assim como a capacidade de absorção sonora dos espaços; tornando possível identificar as suas falhas e desenvolver soluções que as colmatem.

A presente dissertação procura caracterizar as condições acústicas de infantários no geral, tendo como caso de estudo o refeitório e sala polivalente da “Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaelis”. É realizada uma descrição genérica de alguns conceitos teóricos na área da Acústica dos infantários, como o tempo de reverberação, absorção sonora, isolamento sonoro a ruídos aéreos, percussão e de equipamentos, enquadrando-os à luz da legislação nacional em vigor, dados pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, (RRAE).

Para o desenvolvimento de um projeto sustentável é realizada, numa primeira fase, o levantamento geométrico do espaço e a sua caracterização individual no tocante aos parâmetros acústicos: tempo reverberação; ruído de fundo e avaliação da inteligibilidade da palavra, para deste modo ser possível a caracterização das condições acústicas que este possui.

Através de medições realizadas *in situ* foram obtidos o tempo de reverberação médio, na gama dos 500 a 2000 Hz, de 1,38 s; para o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) foi medido o valor médio de 0,55 e o ruído variou entre os 50 e os 74 dB(A), correspondentes ao ruído do fundo sem ocupação e ao ruído máximo de atividade. Para cada um desses parâmetros, foi procedido a uma análise comparativa entre vários estudos realizados por outros autores e os valores ideais definidos em projeto, que comprovam que as condições existentes no caso de estudo não são adequadas para a função à qual foi destinada.

Tendo em contra os resultados dos ensaios, é procedido à apresentação de sugestões de correção acústica, constituídos por três abordagens distintas de aplicação de materiais, onde foram avaliados os ganhos relativos ao tempo de reverberação e a viabilidade económica das mesmas.

Em função das conclusões retiradas da análise económica de cada proposta, são escolhidas 3 soluções adequadas ao espaço estudado, que melhor se aproximam dos níveis de conforto desejáveis, sendo a uma solução final constituída por um sistema de celulose projetada no teto, com um custo total de 2200 €.

Palavras-Chave: Conforto acústico, infantários, ruído de fundo, RASTI, tempo de reverberação.

ABSTRACT

The destined places to the permanence of children, for its function and public-target, become demanding from an acoustic point of view, not only for prescribed requirements, but also for the influence they have on the users. The absence of proper acoustic conditions in the places affects the users directly, having concerning children, consequences in the concentration, cognitive development of the linguistic understanding and reading skills. Also, the staff can feel their efficiency impaired due to environmental factors.

The acoustic characterization of this type of places becomes essential for a correct evaluation of the spaces and acoustic correction of the same. It's important do preliminary studies of the acoustic environment, such as the equipment, outside and background noise; of the involving and respective construction systems; as well as the sound absorption capacity of the spaces, making possible to identify failures and develop solutions that fix them.

The present dissertation looks for to characterize the acoustic conditions of nurseries in general, taking the refectory and multipurpose room of the “Associação Infantário and Jardim de Infância Carolina Michaëlis” as a case study. A generic description of some theoretical concepts in the field of Acoustics in kindergartens is made, such as reverberation time, sound absorption and sound isolation of aerial, percussion and equipment noises, according to the current national legislation, given by the RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

For the development of a sustainable project, it's accomplished a geometric evaluation of the place, it's individual characterization regarding the acoustic parameters: reverberation time, background noise and the intelligibility of the word, in this way to be possible the characterization of the conditions that the space possesses.

Through in situ measurements, the average reverberation time, in the range of 500 to 2000 Hz, of 1,38 s was obtained; for the RASTI (Rapid Speech Transmission Index), the value of 0,55 was measured and the background noise varied between 50 and 74 dB(A), corresponding to the background noise and the maximum noise of the activities accomplished. For each one of these parameters, a comparative analysis was carried between several studies made by other authors and the ideal values defined in the project, which prove that the existing conditions in the case study are not suitable for the purpose which it was intended.

Taking in account the results of the tests, it's presented the suggestion of acoustic corrections, consisting of three different approaches of application of materials, where the gains related to reverberation time and economic viability were evaluated.

Considering the conclusions drawn from the economic analysis of each proposal, three corrective solutions are chosen, that are appropriate to the studied space and come closer to the desirable levels of comfort, which leads to a final solution consisting of a ceiling-mounted cellulose system with a total cost of 2200€

Keywords: Acoustic comfort, nurseries, background noise, RASTI, reverberation time

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE	1
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS	3
2.1.1. SOM E RUÍDO	3
2.1.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	3
2.1.3. NÍVEIS.....	4
2.1.4. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA E NO TEMPO	5
2.1.4.1. Definições.....	5
2.1.4.2. Curvas de Ponderação.....	7
2.2. ABSORÇÃO SONORA	9
2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	10
2.3.1. CONCEITO	10
2.3.2. FÓRMULAS DE PREVISÃO	11
2.3.2.1. Fórmula de Sabine	11
2.3.2.2. Outras Formulações.....	12
2.4. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES	12
2.4.1. CLASSES DE SISTEMAS.....	12
2.4.2. MATERIAIS POROSOS	13
2.4.3. RESSOADORES.....	14
2.4.4. MEMBRANAS.....	15
2.5. ISOLAMENTO SONORO	16
2.5.1. CONCEITO	16
2.5.2. RUÍDOS AÉREOS.....	16
2.5.2.1. Definição	16

2.5.2.2. Isolamento sonoro a ruídos aéreos entre locais	18
2.5.3. RUÍDOS DE PERCUSSÃO.....	19
2.6. PERCEÇÃO DA PALAVRA	20
2.6.1. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	20
2.6.2. PARÂMETROS DE MEDIDA	22
2.6.2.1. Parâmetros subjetivos e objetivos	22
2.6.2.2. Índice de Articulação	22
2.6.2.3. SIL - Interferência na conversação	23
2.6.2.4. STI e RASTI	24
2.7. REFLEXÕES E GEOMETRIA DO ESPAÇO.....	24
 3. ESTADO DA ARTE	 27
3.1. A ACÚSTICA EM INFANTÁRIOS	27
3.2. VALORES IDEAIS DE PROJETO	43
 4. LEGISLAÇÃO.....	 47
4.1. LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL.....	47
4.2. LEGISLAÇÃO EM OUTROS PAÍSES.....	49
4.2.1. REINO UNIDO	49
4.2.2. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA.....	53
4.2.3. FRANÇA	54
4.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAÍSES.....	56
 5. INFANTÁRIO E JARDIM DE INFÂNCIA CAROLINA MICHAËLIS	 57
5.1. INTRODUÇÃO	57
5.2. CARACTERIZAÇÃO	58
5.3. MEDIÇÕES ACÚSTICAS	61
5.3.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS E EQUIPAMENTO UTILIZADO	61
5.3.2. METODOLOGIA.....	63
5.3.2.1. Tempo de reverberação	63
5.3.2.2. Ruído de atividade	64
5.3.2.3. RASTI	65

5.4. ANÁLISE DE RESULTADOS	67
5.4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	67
5.4.2. RUÍDO DE ATIVIDADE.....	69
5.4.2.1. Introdução	69
5.4.2.2. Atividades no interior	69
5.4.2.3. Ruído de fundo sem ocupantes	71
5.4.2.4. Considerações finais	72
5.4.3. RASTI	73
 6. CORREÇÕES ACÚSTICAS	75
6.1. IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS.....	75
6.2. PROPOSTAS DE CORREÇÃO ACÚSTICA.....	75
6.2.1. INTRODUÇÃO	75
6.2.2. PROPOSTAS CORREÇÃO ACÚSTICA.....	76
6.2.2.1. Proposta 1 – Absorvedores suspensos	76
6.2.2.2. Proposta 2 – Painéis Absorventes	80
6.2.2.3. Proposta 3 – Sistemas de celulose projetada.....	82
6.3. ANÁLISE ECONÓMICA DAS PROPOSTAS	84
6.4. CONCLUSÃO.....	87
 7. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	89
7.1. CONCLUSÃO.....	89
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	90
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 2.1. - Variações de pressão no meio e regiões de compressão e rarefação [2]	3
Figura. 2.2. - Intensidade sonora e a relação com a distância r [4]	4
Figura. 2.3. - Som Puro e Som complexo representados pelo oscilograma e espectrograma. [5]	6
Figura. 2.4. - Gama de frequências (humano) [9]	7
Figura. 2.5. - Curvas de igual sensibilidade auditiva [11]	8
Figura. 2.6. - Curvas de ponderação A-B-C-D [11]	8
Figura. 2.7. - Definição de Absorção sonora [13]	10
Figura. 2.8. - Definição de som direto e refletido [14]	10
Figura. 2.9. – Definição de tempo de reverberação [12]	11
Figura. 2.10. - Comportamento em frequência dos três tipos de matérias e sistemas absorventes [1]	13
Figura. 2.11. - Exemplos de materiais porosos (aglomerado de madeira, Fibra mineral e aglomerado negro de cortiça) [16, 17 e 18]	14
Figura. 2.12. - Exemplos de materiais ressoadores isolados (aplicado na conceção de blocos) e agrupados painel metálico perfurado [20 e 21]	15
Figura. 2.13. - Transmissões por via direta e marginal. [12]	16
Figura. 2.14. - Transmissão do ruído aéreo. [23]	17
Figura. 2.15. - Definição de coeficiente de transmissão sonora. [25]	17
Figura. 2.16. - Transmissão de ruídos de percussão. [26]	19
Figura. 2.17. - Situações correntes de criação de ruído de percussão [1]	19
Figura. 2.18. - Laje Flutuante. [27]	20
Figura. 2.19. - Contorno da emissão da palavra. A) plano horizontal; B) Plano vertical. [28]	21
Figura. 2.20. – Reflectograma com presença de eco. [31]	25
Figura. 2.21. – Discos voadores, caso do Royal Albert Hall, Londres [32]	25
Figura. 2.22. – Exemplo de concha orquestra, Palácio de Cristal, Porto [33]	25
Figura. 3.1. – Índice de articulação em função do tempo de reverberação para diferentes níveis de ruído de fundo. [38]	27
Figura. 3.2. – Ruído de fundo registado em salas de aula, registados em estudos anteriores, segundo Bradley e Picard. [Adaptado de 53]	35
Figura. 3.3. – Nível sonoro da voz dos professores, registados em estudos anteriores, segundo Bradley e Picard [Adaptado de 53]	36
Figura. 3.4. – Níveis sonoros médios das atividades, medidos em 32 salas de aula de escolas primárias em Londres. [Adaptado de 55]	38

Figura. 3.5. – Esquema das várias configurações de material absorvente a colocar nas paredes e teto, para as duas escolas primárias na Polónia [Adaptado de 57]	39
Figura. 3.6. – Valores máximos e médios de ruído de fundo para as oito configurações de material absorvente, nas duas escolas primárias, na Polónia [Adaptado de 57]	40
Figura. 3.7. – Comparação dos valores mínimos e médios do nível da voz e relação sinal/ruído para as configurações “L”, “XI” e “XL” nas duas escolas primárias na Polónia [Adaptado de 57]	40
Figura. 5.1. – Vista aérea da Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis [67]	57
Figura. 5.2. – Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis [Fotografia do autor]	57
Figura. 5.3. – Planta do piso -1, (sem escala) [69]	59
Figura. 5.4. – Planta do piso 0 (sem escala) [69].....	60
Figura. 5.5. Sala polivalente e refeitório [Fotografia do autor]	62
Figura. 5.6. – Emissor Brüel & Kjær, modelo 4224 [Fotografia do autor]	62
Figura. 5.7. – Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 [Fotografia do autor]	62
Figura. 5.8. – Equipamento RASTI: Emissor Brüel & Kjær, modelo 4225 [Fotografia do autor]	62
Figura. 5.9. – Recetor Brüel & Kjær, modelo 4419 [Fotografia do autor].....	62
Figura. 5.10. – Tempo de reverberação: localização dos pontos de medição e da fonte sonora na sala polivalente no infantário	63
Figura. 5.11. – Medição do tempo de reverberação no infantário [Fotografia do autor].....	64
Figura. 5.12. – Medição do ruído de atividade na turma de 1 – 2 anos [Fotografia do autor].....	64
Figura. 5.13. – Medição do ruído de atividade na turma de 3 – 4 anos [Fotografia do autor].....	65
Figura. 5.14. – Medição do ruído de fundo na sala polivalente sem ocupação [Fotografia do autor] ..	65
Figura. 5.15. – Medição do RASTI na sala polivalente no infantário [Fotografia do autor]	66
Figura. 5.16. – Medição do RASTI – Localização dos pontos de medição e da fonte sonora no infantário	66
Figura. 5.17. – Tempo de reverberação por banda de frequência dos 125 Hz aos 4000 Hz medidos nos três pontos de medição na sala polivalente e refeitório	68
Figura. 5.18. – Nível de pressão sonora (filtro A) de ruído de atividades para a turma de 1 – 2 anos por banda de frequência de 1/1 oitava entre os 31 Hz e 16 kHz, da sala polivalente e refeitório.....	70
Figura. 5.19. – Nível de pressão sonora (filtro A) de ruído de atividades para a turma de 3 – 4 anos por banda de frequência de 1/1 oitava entre os 31 Hz e 16 kHz	71
Figura. 5.20. – Nível sonoro de ruído de fundo sem ocupação por banda de frequência de 1/1 oitava entre os 31 Hz e 16 kHz.....	72
Figura. 5.21. – Valores de RASTI nos diversos pontos de medição da sala polivalente e refeitório do infantário.....	74
Figura. 6.1. – Esquema geral de painéis absorsores suspensos - Configuração 1	77
Figura. 6.2. – Exemplos de absorsores suspensos (1 – Basotect; 2 – Silencio 2xNVT70-30; 3- SILENTIUM BT50 gross [72-74]).....	78

Figura. 6.3. – Esquema de revestimento acústicos BASWAphon Base sólida [77]	81
Figura. 6.4. – Exemplos sistemas de celulose projetada (esquerda – K13 std meio – K13 special direita – SonaSpray fc [80]	83
Figura. 6.5. – Valores de TR previstos por aplicação de painéis suspensos	84
Figura. 6.6. – Valores de TR previstos por aplicação de revestimentos na totalidade do teto	85
Figura. 6.7. – Valores de TR previstos por aplicação de sistemas de celulose projetada	85

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. - Níveis acústicos [adaptado de 5]	5
Quadro 2.2. Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequências de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [1]	9
Quadro 2.3. Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [Adaptado de 1]	21
Quadro 2.4. Obtenção do parâmetro AI [1]	22
Quadro 2.5. Perceção do grau de inteligibilidade e privacidade em função dos valores de AI [1]	23
Quadro 2.6. Valores limite de SIL para o qual a comunicação da palavra é possível [1]	23
Quadro 2.7. Classificação STI / RASTI [30]	24
Quadro 3.1. Tempo de reverberação em função do volume e frequência. [adaptado de 39].	28
Quadro 3.2. Resumo das medições acústica realizadas em cada escola, nos EUA, segundo Fitzroy e Reid [adaptado de 42].	29
Quadro 3.3. Resumo das medições acústica realizadas em cada escola nos EUA, segundo Kingsbury e Taylor. [adaptado de 43].	30
Quadro 3.4. Resumo das medições acústicas realizadas em cada uma das salas na Universidade da Pensilvânia. [adaptado de 44].	30
Quadro 3.5. Resultados médios dos testes de perceção da palavra para S/R, tempo de reverberação e distância, segundo Crum. [adaptado de 45].	31
Quadro 3.6. Percentagem média correta dos testes de perceção, mais desvio padrão, das consoantes iniciais e finais. [Adaptado de 46]	31
Quadro 3.7. Resultados médios dos vários parâmetros acústicos nas 10 salas de aula, em Ottawa [Adaptado de 49].	32
Quadro 3.8. Inteligibilidade da palavra média para níveis sonoros de 40 e 50 dB(A) nas 10 salas de aula [Adaptado de 49].	33
Quadro 3.9. Resumo das medições acústica realizadas em cada escola [Adaptado de 51].	33
Quadro 3.10. Valores ideais a obter em salas de aula, segundo Crandell e Smaldino [Adaptado de 52].	34
Quadro 3.11. Comparação os valores medidos e os valores ideais a obter em salas de aula, segundo Bradley e Picard [Adaptado de 53].	35
Quadro 3.12. Valores de tempo de reverberação e ruído de fundo para as escolas primárias, em Ohio [Adaptado de 54].	36
Quadro 3.13. Lista de atividades em sala de aula mais comuns nas escolas primárias em Londres [Adaptado de 55]	37
Quadro 3.14. Nível sonoro médio no exterior e no interior das escolas primárias dos bairros A, B e C, em Londres [Adaptado de 56]	38
Quadro 3.15. Resultados dos testes padronizados para os três cenários nas escolas primárias dos bairros A, B e C, em Londres [Adaptado de 56]	39

Quadro 3.16. Valores médios de tempo de reverberação e claridade para as 41 salas de aula de escolas primárias em Ottawa [Adaptado de 58]	41
Quadro 3.17. Valores médios de ruído de fundo e voz dos estudantes em 28 salas de aula de escolas primárias em Ottawa [Adaptado de 58].....	41
Quadro 3.18. Comparação dos valores dos vários parâmetros acústicos medidos antes (2008) e após (2010) a reabilitação na Escola Secundária Rodrigues de Freitas, no Porto [Adaptado de 59]	42
Quadro 3.19. Valores médios de STI, ruído de fundo, e S/R para os quatro tipos de salas de escolas primárias na Austrália [Adaptado de 60]	43
Quadro 3.20. Parâmetros acústicos medidos em salas de aula e infantários por vários autores]	44
Quadro 3.21. Valores ideais de projeto definidos pelo autor	45
Quadro 4.1. Isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{2m, nT w}$) entre o exterior dos edifícios [62]	48
Quadro 4.2. Isolamento sonoro mínimo a sons de condução aérea ($D_{nT w}$) entre locais do edifício [62]	48
Quadro 4.3. Isolamento sonoro máximo a sons de percussão ($L'_{nT w}$) [62]	48
Quadro 4.4. Nível de avaliação a ruídos de equipamentos ($L'_{Ar, nT}$) [62]	48
Quadro 4.5. Tempo de reverberação máximo nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares [62]	49
Quadro 4.6. Isolamento sonoro mínimo a sons de condução aérea ($D_{nT w}$) em edifícios escolares segundo o BB93 [63].....	49
Quadro 4.7. Nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) em edifícios escolares, segundo o BB93 [63].....	50
Quadro 4.8. Índice de isolamento sonoro máximo a ruídos de percussão ($L'_{nT w}$) segundo o BB93 [63]	51
Quadro 4.9. Tempo de reverberação máximo na média das frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o BB93 [63]	52
Quadro 4.10. Valores máximos de ruído de fundo e tempo de reverberação segundo a ANSI S12.60 [65].....	53
Quadro 4.11. Valores máximos de ruído de fundo de tempo provocado pelos equipamentos AVAC segundo a ANSI S12.60 [65].....	54
Quadro 4.12. Valores mínimos de STC (dB) entre salas de aula e diferentes espaços adjacentes segundo a ANSI S12.60 [65].....	54
Quadro 4.13. Valores mínimos de STC (dB) entre espaços de ensino auxiliares e diferentes espaços adjacentes segundo a ANSI S12.60 [65]	54
Quadro 4.14. França – Valores máximos de $L'_{nT, w}$ segundo o decreto de Abril de 2003 [66]	55
Quadro 4.15. França – Valores mínimos de $D_{nT, w}$ (dB) segundo o decreto de Abril de 2003 [66]	55
Quadro 4.16. Tempo de reverberação máximo, na média das frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o decreto de Abril de 2003 [66]	55

Quadro 4.17. Comparação dos valores regulamentares entre Portugal, Reino Unido, EUA e França	56
Quadro 5.1. Características arquitetónicas do piso -1 do caso de estudo [69]	59
Quadro 5.2. Características arquitetónicas do piso 0 do caso de estudo [69]	60
Quadro 5.3. Valores do tempo de reverberação medidos para a sala polivalente e refeitório	67
Quadro 5.4. Comparação entre tempo de reverberação medido e os máximos regulamentares para espaços escolares e valor ideal definido pelo autor	68
Quadro 5.5. Comparação entre tempo de reverberação medido e os valores medidos por outros autores noutras situações	68
Quadro 5.6. Níveis de pressão sonora (com filtro A) do ruído de atividade para a sala polivalente e refeitório do infantário: turma de 1 – 2 anos	69
Quadro 5.7. Níveis de pressão sonora (com filtro A) do ruído de atividade para a sala polivalente e refeitório do infantário: turma de 3 – 4 anos	69
Quadro 5.8. Comparação entre ruído de atividade medido e os valores medidos por outros autores	70
Quadro 5.9. Nível de pressão sonora de ruído de fundo para a sala polivalente e refeitório sem ocupação	71
Quadro 5.10. Comparação entre ruído de fundo medido e valores medidos por outros autores	72
Quadro 5.11. Acréscimo de ruído provocado em cada atividade na sala polivalente e refeitório	73
Quadro 5.12. Resultados de RASTI para a sala polivalente e refeitório do infantário	74
Quadro 5.13. Comparação entre o RASTI medido e valores os máximos medidos por outros autores	74
Quadro 6.1. Valores de TR por banda de frequência, medido in situ, e a estimativa da absorção sonora existente na cantina e sala polivalente	76
Quadro 6.2. Características técnicas painel acústico Basotect 40 mm [72]	78
Quadro 6.3. Características técnicas painel acústico SILENTIUM BT50 gross 50 mm [75]	78
Quadro 6.4. Características técnicas painel acústico SILENTIUM 2xNV70-30 50 mm [76]	79
Quadro 6.5. Resumo das principais características	79
Quadro 6.6. Cálculo do $A_{material}$ e do TR de cada um dos painéis suspensos – configuração 1	80
Quadro 6.7. Cálculo do $A_{material}$ e do TR de cada um dos painéis suspensos – configuração 2	80
Quadro 6.8. Coeficientes de absorção sonora α relativas aos revestimentos acústicos [Adaptado de 77, 78]	81
Quadro 6.9. Cálculo do $A_{material}$ e do TR de cada um dos revestimentos acústicos	82
Quadro 6.10. Coeficientes de absorção sonora α relativas aos sistemas de cellulose projetada [Adaptado de 80]	83
Quadro 6.11. Cálculo do $A_{material}$ e do TR de cada um dos sistemas de cellulose projetada	83
Quadro 6.12. Custo da aplicação de painéis suspensos na sala polivalente e refeitório	86

Quadro 6.13. Custo da aplicação de revestimentos BASWAphon e Sonacoustic no teto da sala polivalente e refeitório	86
Quadro 6.14. Custo da aplicação de sistemas de celulose projetada SonaSpray no teto da sala polivalente e refeitório	87
Quadro 6.15. Avaliação do custo da aplicação de sistemas de celulose projetada SonaSpray no teto da sala polivalente e refeitório.....	87
Quadro 7.1. Comparação entre os parâmetros acústicos medidos e os previstos após aplicação da solução proposta	90

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α - Coeficiente de absorção sonora

A - Absorção sonora equivalente [m^2]

A_0 – Absorção sonora de referência [m^2]

A_1 – Área absorção sonora após aplicação de novo material [m^2]

AI - *Articulation Index*

AC – *Articulation Class*

B – Largura de Banda [Hz]

BB87 – *Building Bulletin 87*

BB93 - *Building Bulletin 93*

c - Celeridade do som [m/s]

C_{50} / C_{80} – Claridade [dB]

D – Isolamento sonoro bruto [dB]

$D_{2m, nT,w}$ – Isolamento sonoro a ruído de condução aérea, padronizado, com o exterior [dB]

$D_{nT,w}$ – Isolamento sonoro a ruído de condução aérea, padronizado para paredes e lajes [dB]

EDT – *Early Decay Time* [s]

FRT – *Fairbank Rhyme Test*

f_0 - Frequência central de banda [Hz]

f_1 - Frequência de limite inferior de banda [Hz]

f_2 - Frequência de limite superior de banda [Hz]

I - Intensidade sonora [W]

I_0 - Intensidade sonora de referência [W/m^2]

L_{Aeq} – Nível sonoro contínuo equivalente [dB]

L_I - Nível de intensidade sonora [dB]

L_P - Nível de pressão sonora [dB]

L_W - Nível de potência sonora [dB]

L'_{nT} – Nível de pressão sonora, medido in situ e padronizado para um tempo de reverberação do compartimento recetor T_0 [dB/oit. Ou dB/ terço oit.]

$L'_{nT,w}$ – Nível de pressão sonora padronizado, medido in situ, para lajes [dB/ terço oit.];

m - Absorção sonora do ar [m^{-1}]

MRT - *Modified Rhyming Tests*

MTF – *Modular Transfer Function*

NC - *Noise Cítéria*

NR - *Noise Rating*

NRC - *Noise Reduction Coefficient*

ρ – Massa volúmica (ar) [kg/m^3]

p - Pressão sonora [Pa]

p_0 - Pressão sonora de referência [Pa]

PB - Phonetically Balanced words

r – Distância [m]

R – Redução sonora medida em laboratório [dB]

R'_w – Índice de redução sonora aparente, in situ [dB]

RASTI - *Rapid Speech Transmission Index*

RGR – Regulamento Geral do Ruído

RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Superfície do elemento de separação [m^2]

SAT – *Standart Assessment Tests*

SII – *Speech Intelligibility Index*

SIL - *Speech Interference Level*

STC – *Sound Transmission Class*

STI - *Speech Transmission Index*

S/R -Relação sinal ruído [dB]

T - Temperatura [K]

T_0 – Tempo de reverberação de referência

TR - Tempo de reverberação [s]

V - Volume [m^3]

W - Potência sonora [W]

W_0 - Potência sonora de referência [W]

λ – comprimento de onda [m]

T - coeficiente de transmissão sonora

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS

A Acústica é o ramo da Física associado ao estudo das ondas sonoras [1]. Esta definição veio a nascer a partir do século XX quando, após experiências na Universidade de Harvard, Wallace Clement Sabine (1868 – 1919), determinou que o tempo de reverberação de uma sala é dos aspetos mais importantes para a obtenção de condições acústicas adequadas.

Dentro das várias áreas do conhecimento abrangidas pela Acústica, como a música, eletroacústica, medicina, estudo dos oceanos, etc, surge a Acústica de edifícios, que não se restringe apenas a auditórios e salas de espetáculo, muito comum nas décadas de 1960 e 1970, ampliando o campo de estudo a escolas, infantários, hospitais, ginásios, etc.

No caso de infantários os problemas resultantes de uma má conceção assumem particular importância, principalmente em crianças, que representam a maioria dos utilizadores desse espaço. Considerando que a aprendizagem é feita por transmissão de informação entre o educador e a criança, via palavra, a existência de espaços reverberantes ou com elevado ruído de fundo vão levar a situações em que o discurso chega às crianças com falhas, por não possuírem o mesmo nível de conhecimento e um sistema auditivo totalmente desenvolvido, como é o caso dos adultos. Como consequência, a capacidade de concentração, assim como o desenvolvimento da compreensão linguística e escrita vão ser afetadas, que se torna evidente na resolução de tarefas mais complexas que pode levar a uma quebra de rendimento escolar e possíveis problemas auditivos a longo-prazo.

Em relação a adultos, a ausência de condições adequadas leva a um aumento do esforço exercido, principalmente ao nível da voz, para se sobreponem às condições existentes, o que vai causar uma quebra no rendimento profissional e problemas de saúde.

O principal objetivo do presente trabalho é a caracterização acústica de infantários, tendo como exemplo a sala polivalente e refeitório do Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis, através da medição de parâmetros acústicos *in situ*:

- Tempo de reverberação;
- Ruído de fundo e de atividade;
- Inteligibilidade da palavra.

Face aos resultados obtidos nos ensaios, estes serão comparados a publicações feitas ao longo dos anos e com os limites regulamentares do RRAE, sendo ainda propostos algumas soluções de correção acústica, com a respetiva análise económica e melhorias acústicas em relação às condições atuais do espaço.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, apresentados da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Enquadramento do tema e dos principais objetivos a alcançar no presente trabalho, assim como a estrutura da dissertação;
- Capítulo 2 – Descrição dos conceitos acústicos mais importantes para melhor compreensão do tema e de todas as avaliações feitas nos capítulos seguintes;

- Capítulo 3 – Revisão de vários estudos realizados ao longos dos anos relacionados com a Acústica de salas de aula e infantários, que servem de base para o desenvolvimento dos valores ideais de projeto;
- Capítulo 4 – Apresentação da Legislação de Acústica em Portugal e noutros países;
- Capítulo 5 – Caracterização do caso de estudo, onde é feita uma descrição das características geométricas, dos ensaios a realizar, assim como o registo, análise e discussão das mesmas relativamente aos valores de projeto, outros casos de estudo e a legislação portuguesa;
- Capítulo 6 – Descrição das propostas de correção acústica, sendo abordados as características de cada alternativa, melhorias acústicas e a análise económica das mesmas;
- Capítulo 7 – Apresentação das conclusões de toda a dissertação e de aspetos importantes a desenvolver no futuro.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS

2.1.1. SOM E RUÍDO

O estímulo sonoro é um fenómeno físico, que poder ser definido por uma vibração, isto é, uma variação de pressão, num meio elástico, como no caso do ar ou da água, que através de uma fonte sonora (altifalante, cordais vocais, diapasão, etc), transmite esse estímulo ao ouvido humano. Se a resposta do recetor, face a esse estímulo, tiver significado auditivo, define-se como *Som*. No caso oposto, *Ruído* traduz-se na resposta desagradável ou sem significado auditivo [1]

O som é gerado pela variação de pressão no meio de propagação das ondas sonoras, em geral o ar, sob forma de ondas esféricas concêntricas, tendo a fonte sonora como o centro. O movimento de vibração das partículas provoca no meio de propagação zonas de compressão e de rarefação, consequência da transmissão do movimento das partículas, por choque, às partículas seguintes (figura 2.1) [2]

Por essa razão, a variação de pressão ao longo do meio de propagação torna-se no elemento mais importante na descrição do sinal sonoro, tomando como situação de referência a pressão atmosférica normal, que toma como valor aproximado 101400 Pa [1]

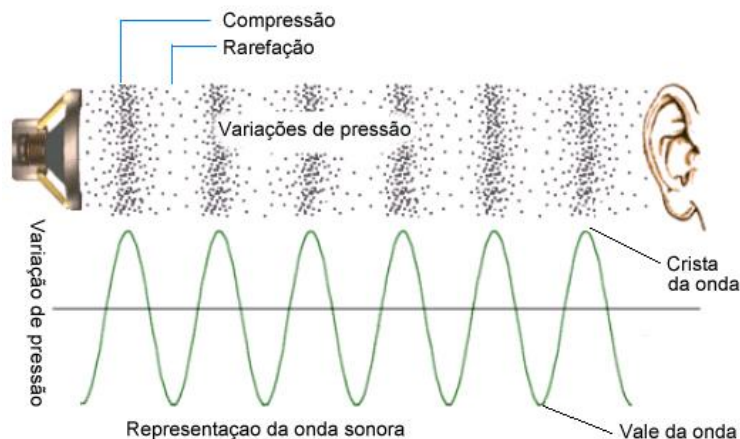


Figura. 2.1. - Variações de pressão no meio e regiões de compressão e rarefação [2]

2.1.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

Para além da pressão, há outras grandezas importantes para a caracterização da propagação sonora, tais como a intensidade e a potência sonora.

A intensidade sonora, numa dada direção, traduz-se na quantidade de energia que atravessa por segundo, uma área de 1 m², perpendicular a essa direção e quantifica-se em W/m². Como permite avaliar a componente direcional do som atravessada, esta passa a ser representado por uma grandeza vetorial e não escalar [1] A figura 2.2 representa a relação entre a intensidade e o aumento da distância.

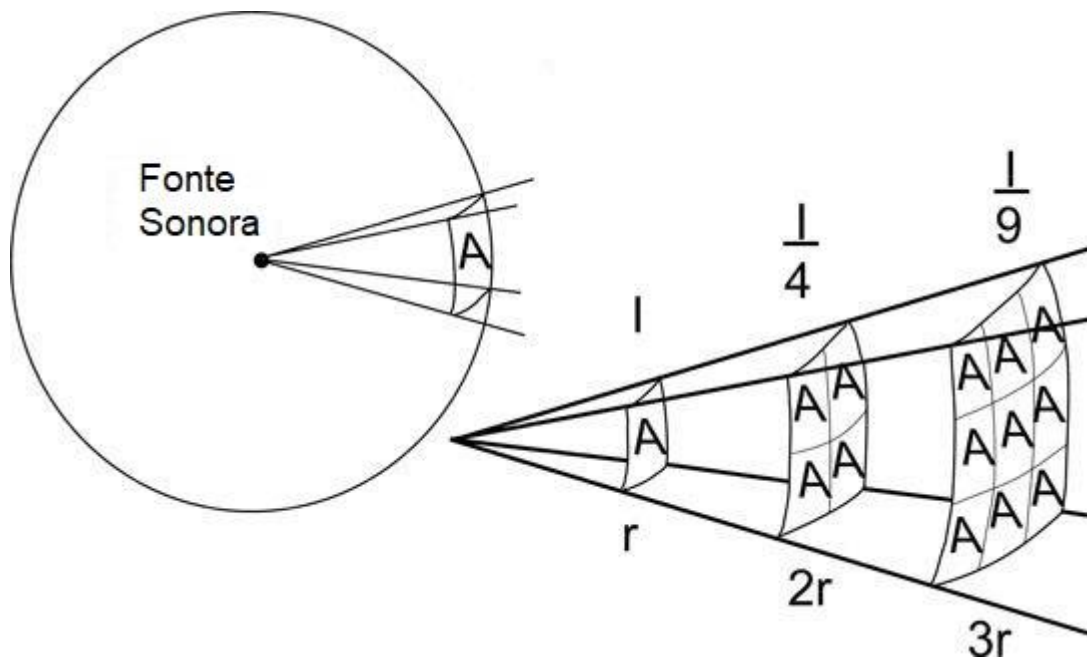


Figura. 2.2. - Intensidade sonora e a relação com a distância r [4]

A potência sonora, característica da fonte, é definida como a energia total, que num segundo, atravessa uma esfera fictícia de raio r , centrada na fonte, e quantifica-se em *watt* (W) [1]

A intensidade, potência sonora e a pressão sonora relacionam-se entre si, de acordo com a expressão 2.1.

$$I = \frac{W}{4\pi r} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.1)$$

Sendo:

- I – Intensidade sonora (W/m^2);
- W – Potência sonora (W);
- r – Distância (m);
- p – Pressão sonora (Pa);
- ρ – Massa volúmica ($\text{ar} \approx 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$);
- c – Celeridade ($\text{m}/\text{s} \approx 340 \text{ m}/\text{s}$).

2.1.3. NÍVEIS

Um ser humano jovem e com audição normal consegue ouvir desde cerca de 10^{-5} Pa , correspondente ao “limiar da audição”. No outro extremo, o valor máximo situa-se nos 100 Pa , denominada “limiar da dor”, onde a sensação auditiva passa de ruído a dor [1, 6]

Como o ouvido humano responde a uma gama de audibilidade no domínio da pressão, (10^7 Pa), a análise através de uma escala linear em *pascal* leva a um conjunto de valores pouco evidentes e sem uso prático, que acresce do fato do ouvido humano responder ao estímulo sonoro de um modo aproximadamente logarítmico. [1]

A unidade mais adequada é o decibel (dB), correspondente a um décimo do *bel*, denominação atribuída em honra ao cientista Alexander Graham Bell. Esta unidade é utilizada sempre que pretenda determinar o nível de alguma quantidade face a um valor de referência, não se restringindo só ao ramo da Acústica.

Podem-se representar outras grandezas, caracterizadoras do fenómeno sonoro, em dB. O Quadro 2.1 indica as expressões necessárias para a conversão da pressão, intensidade e potência sonora em níveis correspondentes, assim como os respetivos valores de referência [5]

Quadro 2.1. - Níveis acústicos [adaptado de 5]

Grandeza	Expressão (dB)	Valor de Referência
Pressão Sonora	$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
Intensidade Sonora	$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$	$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
Potência Sonora	$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}$	$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$

Como a escala utilizada na fórmula de conversão, em dB, é logarítmica, a soma entre níveis procede de forma não algébrica. A soma resultante de duas fontes sonoras iguais, a emitirem simultaneamente, é dada pela seguinte formulação [1]

$$\begin{aligned}
 L_{soma} &= L_1 + L_1 \\
 L_{soma} &= 10 \log \frac{p_1^2}{p_0^2} + 10 \log \frac{p_1^2}{p_0^2} \\
 L_{soma} &= 10 \log \frac{2p_1^2}{p_0^2} \\
 L_{soma} &= 10 \log 2 + 10 \log \frac{p_1^2}{p_0^2} \\
 L_{soma} &= 3 + L_1
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

No caso da adição de várias fontes sonoras, com n níveis de pressão sonora diferentes, a soma resultante é dada pela expressão geral (2.3).

$$L_{total} = 10 \times \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \tag{2.3}$$

2.1.4. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA E NO TEMPO

2.1.4.1. Definições

A frequência é a segunda característica mais importante, para a definição do estímulo sonoro, que pode ser designado como som puro ou som complexo. O som puro é aquele que está associado a uma só frequência, enquanto os sons complexos são a associação de vários sons puros (figura. 2.3). A análise desta propriedade ganha importância pois os sons mais correntes do dia-a-dia (palavra, música, etc) são complexos e permite a distinção da fonte sonora através da frequência emitida [1]

A frequência, medida em *hertz* (Hz), traduz-se no número de ciclos completos que a onda sonora cumpre por segundo. No domínio da Acústica de Edifícios, a frequência divide-se em três zonas distintas [1]

- Frequências graves: 20 a 355 Hz;
- Frequências médias: 355 a 1410 Hz;
- Frequências graves: 1410 a 20000 Hz.

Relativamente às ondas sonoras, o “tamanho” é outra propriedade a mencionar. O comprimento de onda λ é a distância entre dois pontos idênticos consecutivos da onda periódica e tem uma relação de proporcionalidade inversa com a frequência (f). O comprimento de onda pode ser determinado através da expressão 2.4 [1]

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ (m)} \quad (2.4)$$

- λ – Comprimento de onda (m);
- c – Celeridade (m/s) ≈ 340 m/s;
- f – Frequência (Hz).

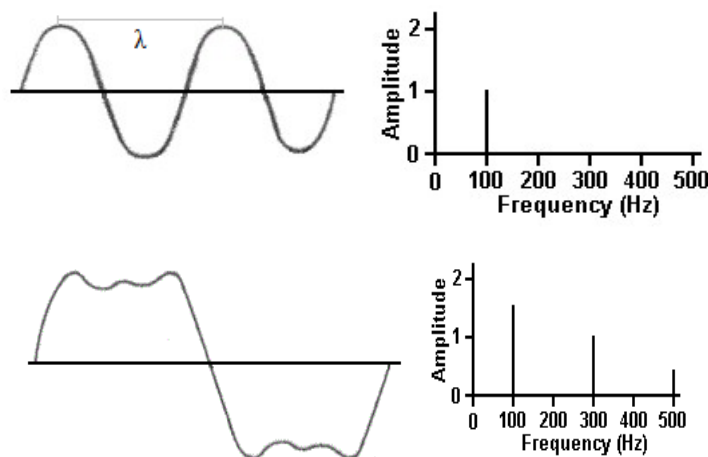


Figura. 2.3. - Som Puro e Som complexo representados pelo oscilograma e espectrograma. [5]

A audição humana encontra-se numa gama compreendida entre os 20 e os 20000 Hz (Figura 2.4). Com o passar do tempo, as capacidades auditivas deterioraram-se e a gama audível é menor, sendo a perda mais notada nas altas frequências [8]

Qualquer som abaixo dos 20 Hz é designado de infra-som, que tem utilidade prática na previsão de um fenómeno sísmico ou vulcânico, dado que os sons consequentes dos movimentos na crosta terrestre são de frequência muito baixa para o ser humano ouvir. O ultra-som é relativo a sons com frequência superior a 20000 Hz e são utilizados no campo da medicina, na realização de ecografias, por exemplo. [9]

Uma vez que a caracterização de um som complexo levaria à análise detalhada de centenas ou mesmo milhares de frequências, é necessário separar o som/ruído em agrupamentos de frequências, que são designados por bandas.

A banda é um agrupamento de frequências, delimitado inferiormente (f_1), superiormente (f_2), e f_0 como valor médio designado por frequência central. Largura de Banda (B) é definido como a diferença entre

os limites superior e inferior. Existem diversas bandas de frequências de diversas larguras, mas em Acústica, as mais correntes são as bandas de 1/1 oitava e de 1/3 oitava, centradas nos valores de f_0 :

- Banda de 1/1 oitava: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz;
- Banda de 1/3 oitava: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000 e 20000 Hz.

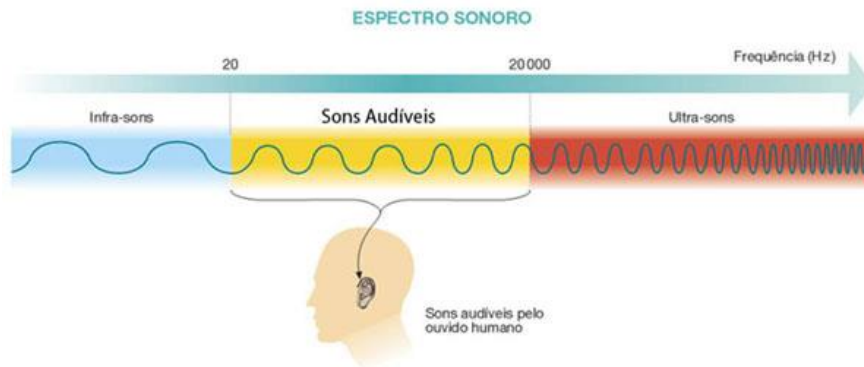


Figura. 2.4. - Gama de frequências (humano) [9]

Para além da pressão e da frequência, a duração da onda sonora é outra propriedade a estudar, porque o ruído pode variar entre situações com duração instantânea (faíscas ou disparos) e ruídos de duração quase infinita, como quedas de água [1]

Como o ruído não é constante ao longo do tempo e a gama de valores resultantes são muito dispersos, foi necessário recorrer a parâmetros energéticos para a avaliação do estímulo sonoro num dado intervalo de tempo.

O nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) é uma grandeza energética definida como o nível sonoro de um som que contém a mesma energia da globalidade do ruído para um dado intervalo de tempo, (expressão 2.5) [1]

$$L_{eq} = 10 \times \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.5)$$

Sendo:

- T – Tempo de medição (s);
- $p(t)$ – Pressão instantânea (Pa);
- p_0 – Pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

2.1.4.2. Curvas de Ponderação

O sistema auditivo humano tem uma sensibilidade auditiva variável às varias frequências. Dependendo da intensidade sonora do som, o ouvido humano é mais sensível para frequências da ordem dos 2300 a 2800 Hz e muito pouco sensível para baixas frequências. Deste modo, surgem as curvas de igual sensibilidade auditiva, graduadas pela unidade *fone*. Nestas curvas verifica-se a perda de sensibilidade auditiva para as baixas frequências através do elevado encurvamento (figura 2.5) [10, 11]

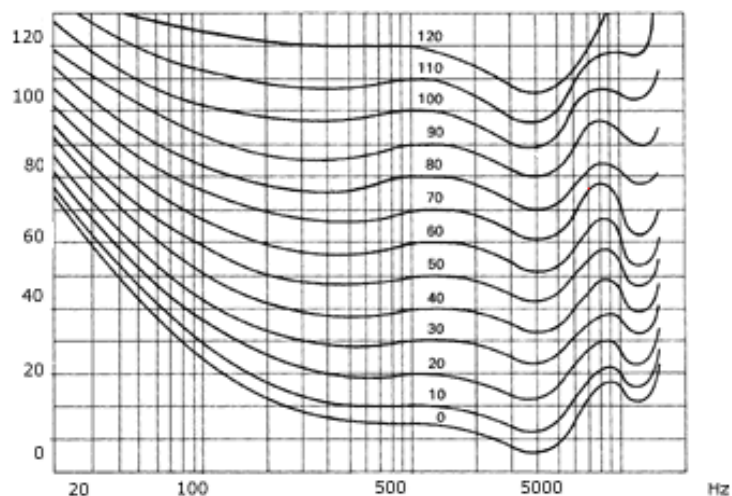


Figura. 2.5. - Curvas de igual sensibilidade auditiva [11]

Na situação oposta, os equipamentos de medição captam de igual modo qualquer frequência do som. De maneira a aproximar os valores medidos pelos equipamentos às particularidades do sistema auditivo, introduziram-se filtros eletrónicos ou curvas de ponderação, que representam as correções em função das frequências captadas (figura 2.6). Das curvas de ponderação, a mais usada atualmente e globalmente aceite é a Curva A, que aproxima os ruídos à resposta humana. Existem também as curvas B, C e D, que estão relacionadas com casos mais específicos, tais como ruídos de alta intensidade ou ruídos de aviões [1]

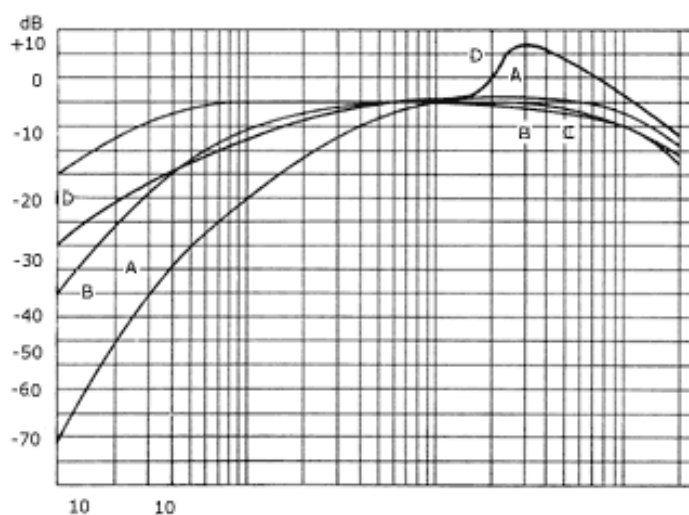


Figura. 2.6. - Curvas de ponderação A-B-C-D [11]

Através dos valores captados por cada banda de frequência e dos valores corretivos das curvas de ponderação (Filtro A), é possível determinar o nível sonoro, que traduz a energia acústica de um ruído

filtrado por uma curva de ponderação, expresso em dB (A). No quadro 2.2 são apresentados os valores das ponderações da curva A para as bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava.

Quadro 2.2. Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequências de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [1]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)
25	-44,7		800	-0,8	
31	-39,4	-40	1k	0	0
40	-34,6		1,25k	0,6	
50	-30,2		1,6k	1,0	
63	-26,2	-26	2k	1,2	+1
80	-22,5		2,5k	1,3	
100	-19,1		3,15k	1,2	
125	-16,1	-15,5	4k	1,0	+1
160	-13,4		5k	0,5	
200	-10,9		6,3k	-0,1	
250	-8,6	--8,5	8k	-1,1	-1
315	-6,6		10k	-2,5	
400	-4,8		12,5k	-4,3	
500	-3,2	-3	16k	-6,6	-7
630	-1,9		20k	-9,3	

2.2. ABSORÇÃO SONORA

Em Acústica de Edifícios, há dois tipos de situações que importam estudar: [12]

- Correção Acústica - Propagação do som no interior de espaços fechados, tais como salas de aula, auditórios salas de concerto e quais as medidas corretivas a aplicar para um correto funcionamento acústico, adequado ao seu volume e às suas funções;
- Isolamento sonoro, que se refere ao tratamento de um compartimento para ruídos com origem no exterior, de/para locais contíguos.

Na Correção Acústica, um dos aspetos mais importantes a estudar é a absorção sonora. Esta propriedade acústica é uma característica do material e traduz-se na capacidade em transformar parte da energia sonora, incidida sobre ele, em qualquer outro tipo de energia, habitualmente a térmica, como mostra a figura 2.7.

Denomina-se de coeficiente de absorção sonora (α), (expressão 2.6), a relação entre a energia sonora que é absorvida pelo material e aquela que sobre ele incide.

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.6)$$

Dizer que o coeficiente de absorção sonora é igual a 0,3 significa que 30% da energia incidida é absorvida pelo material. O coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1, apesar de alguns casos apresentarem valores superiores à unidade, que se devem ao tipo de ensaios e metodologias de determinação, mas nunca deverão ser aplicados em cálculos. Um material é considerado acusticamente absorvente sempre que tem o α superior a 0,5, ao passo que um material refletor tem um α quase nulo

[1] O valor de α varia com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente. Como tal, existem tabelas com os valores α em função da frequência de alguns materiais e sistemas.

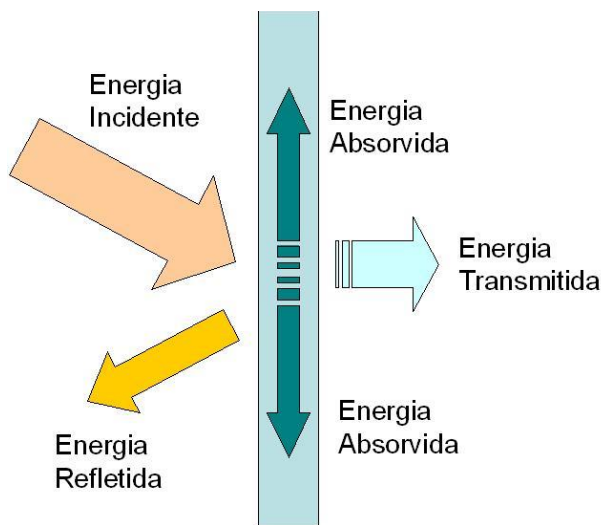


Figura. 2.7. - Definição de Absorção sonora [13]

2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.3.1. CONCEITO

Um dos parâmetros mais importantes para a definição da qualidade acústica de um local é o tempo de reverberação. Para um dado compartimento, com a presença de uma fonte sonora, as ondas sonoras resultantes podem ser de origem direta ou refletida. As ondas diretas chegam em primeiro lugar uma vez que o percurso feito, desde a fonte sonora, é em linha reta. Os sons refletidos atingem o recetor após múltiplas reflexões nas superfícies existentes, que vão se tornando mais fracas com as absorções que sofrem em cada reflexão e pelo efeito da absorção do ar, conforme a figura 2.8 mostra.

O tempo de reverberação (TR) é definido como o intervalo de tempo, medido em segundo, em que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB, a partir do momento em que a fonte sonora deixa de emitir (figura 2.9) [1]

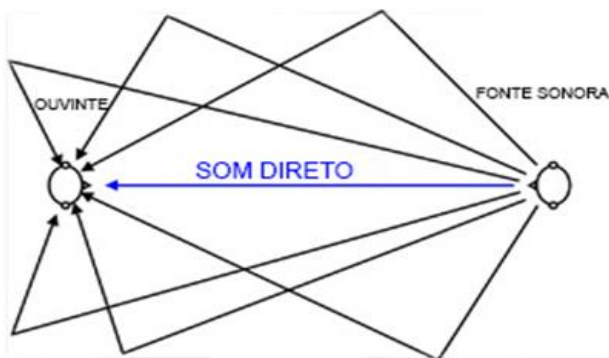


Figura. 2.8. - Definição de som direto e refletido [14]

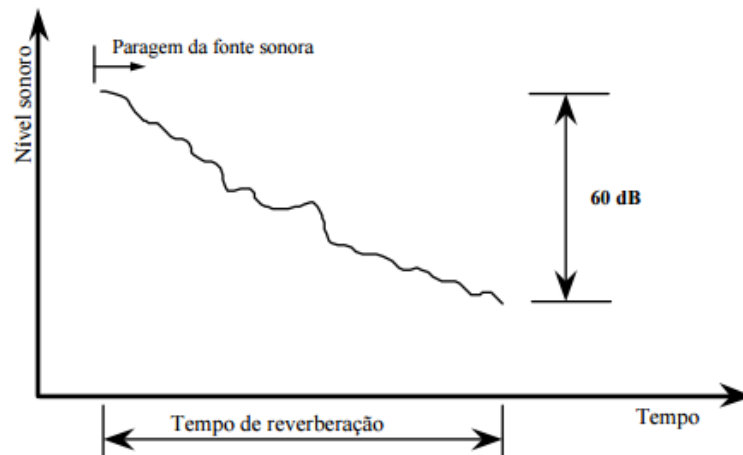


Figura. 2.9. – Definição de tempo de reverberação [12]

Sendo uma característica importante para a caracterização acústica de qualquer espaço, o tempo de reverberação tem um duplo e antagónico efeito [1]

- Pode ser considerado como um aspeto positivo através do aumento do nível sonoro, por acréscimo do som refletido ao som direto;
- Efeito negativo por mascarar o som direto, por sobreposição do som refletido ao som direto.

É de salientar que o tempo de reverberação traz consequências ao nível da perceção da palavra e na música. Uma elevada reverberação conduz a uma redução da inteligibilidade da palavra, que se deve à intensidade sonora e curto período das consoantes que é suplantada pelas vogais imediatamente antecedentes, que emitem a um nível mais elevado e com maior duração. Logo, para lugares onde a palavra seja importante (auditórios ou salas de aulas), é importante ter tempos de reverberação baixos [1, 5]

Em lugares destinados à música, é desejável obter tempos de reverberação mais altos (superiores a 1,5 s) uma vez que as peças musicais soam melhor na presença de alguma reverberação e de modo a que as notas musicais sejam entendidas com excessiva clareza. [1]

2.3.2. FÓRMULAS DE PREVISÃO

2.3.2.1. Fórmula de Sabine

Em 1895, o físico Wallace Clement Sabine, foi encarregado de resolver os problemas da acústica do *Fogg Lecture Hall*, parte do recém-construído *Fogg Art Museum*. [15] Depois de muitas experiências e medições, Sabine formulou a primeira equação matemática que relaciona o tempo de reverberação, a absorção sonora e o volume, conhecida hoje como a “Fórmula de Sabine” (2.7) [1]

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.7)$$

Sendo:

- TR – Tempo de reverberação (s);
- V – Volume do compartimento (m³);
- A – Absorção sonora equivalente (m²):

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.8)$$

- α – Coeficiente de absorção sonora do material;
- S – Superfície do material (m^2).

Esta fórmula permite a obtenção de valores próximos da realidade em locais com um coeficiente de absorção média inferior a 0,20, correspondendo a locais com um campo sonoro difuso, daí a utilização da fórmula nos ensaios em câmara reverberante [1, 5]

2.3.2.2. Outras Formulações

Ao longo dos anos foram surgindo alternativas à fórmula de Sabine, capazes de colmatar algumas deficiências na sua utilização:

A fórmula de Eyring é adequada para situações onde o coeficiente de absorção sonora é semelhante em todas as superfícies do local, como mostra a expressão 2.9. A expressão 2.10, de Millington-Sette, diz respeito ao cenário das superfícies do local apresentarem coeficientes de absorção muito distintos.

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.9)$$

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{-\sum_{i=1}^N S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2.10)$$

Ainda se pode generalizar a fórmula de Sabine (2.11), incluindo parâmetros como a absorção do ar ($m \cdot V$), que é em função da frequência e da humidade relativa, e a absorção localizada A_j (mobiliário, pessoas de pé por exemplo).

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (2.11)$$

2.4. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES

2.4.1. CLASSES DE SISTEMAS

Os materiais e sistemas absorventes podem ser diferenciados através das suas características físicas e mecanismos de funcionamento. Em função dessas características da frequência (figura 2.10), os materiais e sistemas absorventes podem ser classificados em: [1, 10]

- Porosos, que têm maior eficácia nas altas frequências;
- Ressonadores, que atuam nas médias frequências;
- Membranas, que são mais eficazes nas baixas frequências.

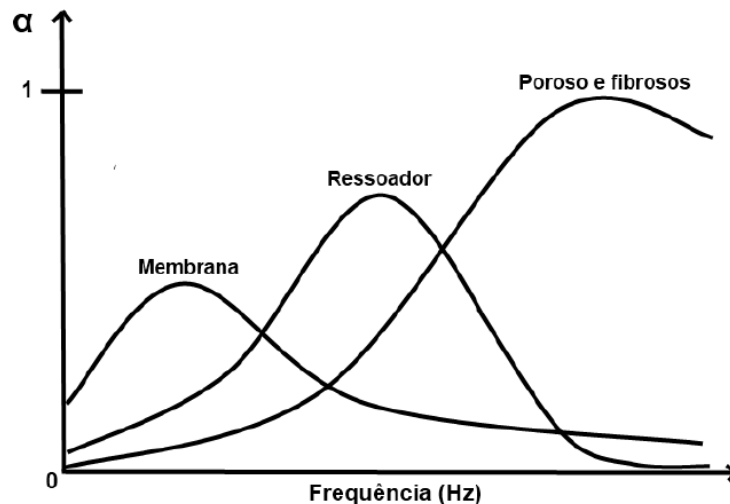


Figura. 2.10. - Comportamento em frequência dos três tipos de matérias e sistemas absorventes [1]

2.4.2. MATERIAIS POROSOS

O processo de absorção sonora neste tipo de materiais baseia-se na existência de poros e interstícios. Quando a onda sonora incide sobre o material, a energia é transformada em calor e parte dela é transferida devido ao movimento das fibras que resistem por fricção. Um maior afastamento das fibras significa uma menor dissipação de energia, o que leva a uma maior absorção sonora. Na situação oposta, a existência de fibras muito concentradas leva a maiores dificuldades de penetração e o movimento do ar não gera fricção, pelo que haverá uma diminuição da absorção sonora. Um bom material absorvente deve-se encontrar entre esses limites [1, 10]

Logo, o desempenho deste tipo de materiais está relacionado com a capacidade em dissipar energia nos poros, assim como estão dependentes da espessura e densidade do material. Situações como a pintura das superfícies colocam em causa a eficácia dos mesmos, pelo que devem ser evitados [1]

Os materiais porosos são agrupados em função das suas características físicas e podem ser divididos em:

- **Tecidos e Alcatifas:** A capacidade de absorção em alcatifas está relacionada com a espessura e do tipo de suporte. Em tecidos, o comportamento acústico depende do peso específico, grau de franzido e distância à parede;
- **Massas porosas:** Material com massa específica de cerca de 150 kg/m^3 que apresenta excelente comportamento acústico;
- **Aglomerados de madeira:** painéis de aparas de madeira, que apresentam razoável comportamento acústico (figura 2.11, à esquerda);
- **Fibras minerais:** constituídos por mantas, painéis ou placas em lã de rocha, vidro, por exemplo, onde a absorção sonora depende da espessura, densidade e largura da caixa de ar. Um aumento na espessura leva a ganhos cada vez menores de absorção, a densidade influencia apenas numa gama restrita (25 a 100 kg/m^3) e o espaçamento do material melhora o desempenho para as baixas frequências (figura 2.11, ao centro);
- **Materiais plásticos:** materiais como o poliuretano ou poliestireno expandido podem ser usados para fins acústicos ou térmicos;

- **Aglomerados de cortiça:** só o aglomerado negro de cortiça apresenta valores aceitáveis de α , podendo ser considerado como um material absorvente (Figura 2.11, à direita).



Figura. 2.11. - Exemplos de materiais porosos (aglomerado de madeira, Fibra mineral e aglomerado negro de cortiça) [16, 17 e 18]

2.4.3. RESSOADORES

Os ressoadores são sistemas que atuam com maior eficácia nas médias frequências e podem ser classificados em:

- Ressoadores isolados – Ressoador de Helmholtz (Figura 2.12, esquerda);
- Ressoadores agrupados – painéis perfurados metálicos ou de madeira (Figura 2.12, direita).

O ressoador de Helmholtz é um sistema constituído por uma cavidade de paredes rígidas e uma única abertura, assemelhando-se a uma garrafa vazia. O seu funcionamento baseia-se no movimento das ondas sonoras para o interior da cavidade. No interior, o ar associado à onda sonora vai contactar com o ar existente na cavidade, provocando movimento de massa de ar, acompanhada por dissipação de energia devido ao atrito, formando um sistema em ressonância [10] A frequência de ressonância corresponde à situação onde a absorção é máxima e varia em função das características do gargalo e do volume da cavidade [19] A frequência de ressonância de máxima absorção pode ser calculada da seguinte forma:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l + 1,6r)}} \quad (2.12)$$

Sendo:

- c – Celeridade do ar (m/s);
- S – Área do orifício de entrada (m²);
- V – Volume da cavidade interior (m³);
- l – Comprimento do gargalo (m);
- r – Raio do gargalo (m).

Os ressoadores agrupados são constituídos por painéis perfurados de madeira ou metálicos, afastados da estrutura de suporte através de um espaço de ar. Este sistema possui o mesmo princípio de funcionamento que o ressoador de Helmholtz, onde as perfurações ao longo do material representam a entrada de um ressoador, a espessura atua como gargalo e restante parte do material funciona como cavidade.[10] A eficácia de absorção está relacionada com a taxa de perfuração do painel, isto é, a

absorção será maior quanto maior for a taxa de perfuração, que atinge o limite aos 25%, dado que o comportamento do painel passa a ser controlado pela porosidade do material absorvente [1]

A frequência de ressonância é calculada pela expressão (2.13), sendo válida quando $f \times d < 3400$ Hz.cm.

$$f = \frac{10 \cdot c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6r)d}} \quad (2.13)$$

Onde:

- c – Celeridade do ar (m/s);
- P – Percentagem de área perfurada (%);
- e – Espessura da placa perfurada (cm);
- d – Largura da caixa de ar (cm);
- r – Raio de cada perfuração (cm).

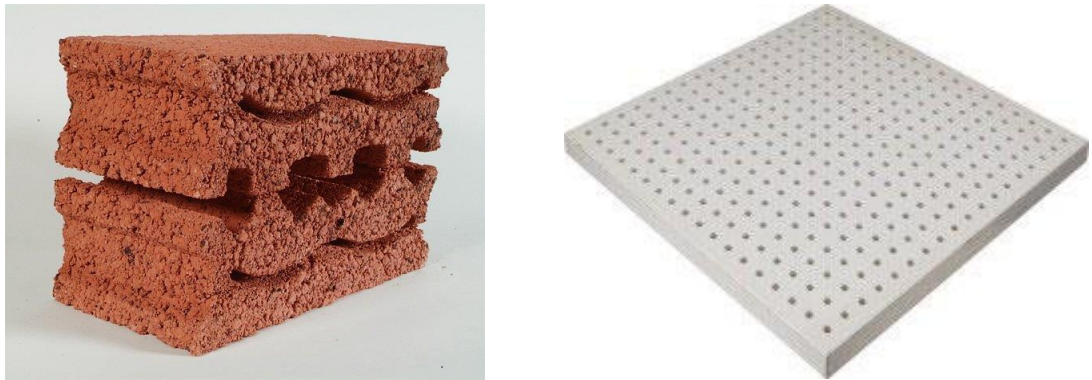


Figura. 2.12. - Exemplos de materiais ressoadores isolados (aplicado na concepção de blocos) e agrupados
painel metálico perfurado [20 e 21]

2.4.4. MEMBRANAS

As membranas (figura 2.13) são sistemas constituídos por painéis sólidos de pequena espessura e não perfurados, instalados sobre um suporte rígido e separados por um espaço de ar [19]

Sempre que as ondas sonoras incidem sobre a estrutura, por fenómenos de vibração e flexão, parte da energia será absorvida pelo material, enquanto a restante será transformada em calor e dissipada por fricção das suas fibras. O sistema absorve e dissipa a energia para a frequência do som incidente que corresponde à frequência natural de vibração [1]

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \cong \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (2.14)$$

- c – Celeridade do ar (m/s);
- ρ – Massa volúmica (ar $\approx 1,2$ kg/m³);
- m – Massa superficial (kg/m²);
- d – Largura da caixa de ar (cm);
- f – Frequência natural de vibração (Hz).

2.5. ISOLAMENTO SONORO

2.5.1. CONCEITO

O isolamento sonoro refere-se à proteção do edifício contra a propagação do ruído, com origem exterior a esse local, através de medidas para a minimização do nível do ruído proveniente da envolvente exterior (fachadas, coberturas) e de elementos interiores (paredes e lajes) [12]

Para a caracterização do isolamento sonoro, é importante a distinção entre duas situações:

- Ruídos de condução aérea: propagação feita somente por vibração do ar e transmitida através dos elementos de construção (paredes, janelas, etc);
- Ruídos de percussão: transmissão feita através de solicitação mecânica da fonte sonora sobre elementos de construção.

Como o isolamento sonoro implica a propagação do ruído entre dois locais distintos, entre o local que produz o estímulo sonoro e o outro onde se pretende que o estímulo apresente um nível baixo quanto possível [22]. Como tal, é necessário subdividir em duas formas de transmissão (figura 2.13) [12]:

- Direta: Transmissão do ruído através de um único elemento de construção comum a ambos os compartimentos;
- Marginal: Transmissão do ruído através de elementos adjacentes ou de espaços laterais.

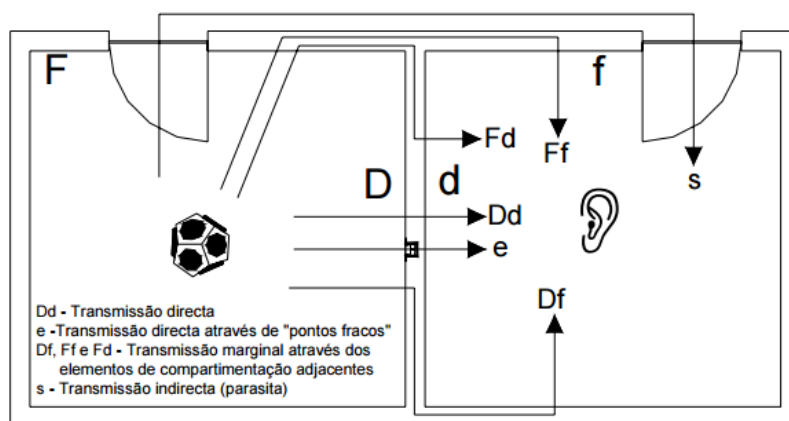


Figura. 2.13. - Transmissões por via directa e marginal. [12]

2.5.2. RUÍDOS AÉREOS

2.5.2.1. Definição

Os ruídos aéreos (figura 2.14) são aqueles em que a transmissão é provocada por vibração do ar por parte de uma fonte sonora, sem recurso a qualquer solicitação mecânica na estrutura do edifício. A conversação, música, tráfego rodoviário e aéreo, são alguns exemplos de fontes de ruídos com origem aérea.

A onda sonora ao incidir sobre a superfície tem uma componente da energia que não é refletida ou absorvida pelo elemento de separação, mas sim transmitida para o espaço recetor. Assim sendo, quanto maior for a diferença entre a energia incidida e a energia transmitida ao recetor, maior será o isolamento sonoro a ruídos aéreos. [24]

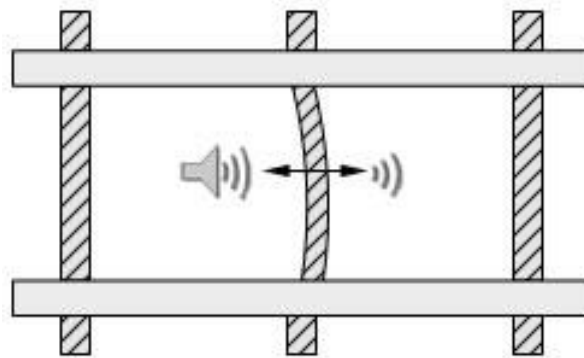


Figura. 2.14. - Transmissão do ruído aéreo. [23]

A avaliação do isolamento sonoro terá de ter em conta o comportamento acústico em duas situações:

- Comportamento isolado de um elemento construtivo (parede, pavimento);
- Transmissão entre dois espaços, que engloba o comportamento do elemento separador, assim como de toda a envolvente. [1]

Uma vez que o comportamento acústico do elemento construtivo depende da massa e/ou da duplicação do elemento separador, estas tornam-se nas duas formas genéricas de aumentar o isolamento sonoro a ruídos aéreos. [1, 16]

O parâmetro que define o isolamento sonoro de um elemento construtivo é designado por redução sonora (R , em dB), definido pela expressão 2.15.

$$R = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau} \quad (2.15)$$

Em que τ corresponde ao coeficiente de transmissão, que é a razão entre a energia sonora transmitido em relação ao incidente. (figura 2.15). A redução sonora será tanto maior quanto menor for o coeficiente de transmissão, o que leva a um aumento do isolamento sonoro.

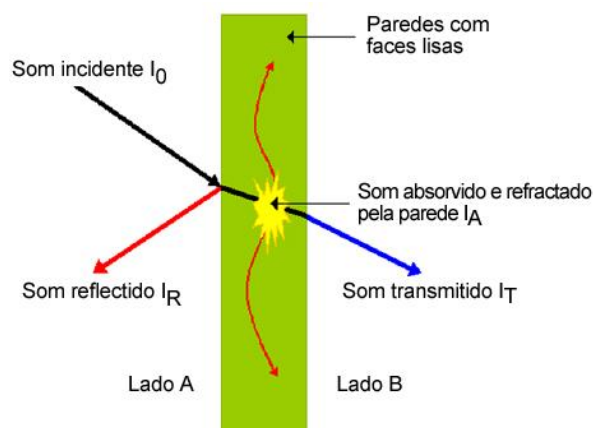


Figura. 2.15. - Definição de coeficiente de transmissão sonora. [25]

2.5.2.2. Isolamento sonoro a ruídos aéreos entre locais

O isolamento sonoro bruto (D) é definido pela diferença entre o nível de pressão sonora do local emissor e o nível de pressão sonora medido no recetor, sem qualquer tipo de correção, por banda de frequência [1].

$$D = L_{emissor} - L_{recetor} \quad (2.16)$$

Esta grandeza pode ser relacionada com o parâmetro R (redução sonora), tendo em consideração as características do elemento separador e do espaço recetor, como as dimensões físicas e absorção sonora do compartimento.

$$D = L_{emissor} - L_{recetor} = R + 10 \cdot \log \frac{A}{S} \quad (2.17)$$

Sendo:

- R – Redução sonora, medida em laboratório (dB);
- A – Área de absorção sonora equivalente existente no compartimento recetor (m²);
- S – Superfície do elemento de separação (m²).

É de salientar que a redução sonora pode ser considerada através de medições *in situ*., designada por R' (redução sonora aparente), de modo a considerar a existência de transmissões marginais. [1]

Segundo a atual legislação (RRAE), o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, padronizado, é distinto para compartimentos interiores (D_{nT,w}) e paredes exteriores (D_{2m,nT,w}), (expressões 2.18 e 2.19):

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \cdot \log \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot T_0} \quad (2.18)$$

Sendo:

- D_{nT,w} – Isolamento sonoro a ruído de condução aérea, padronizado (dB);
- R'_w – Índice de redução sonora aparente, *in situ* (dB);
- V – Volume do compartimento recetor (m³);
- S – Área da superfície de separação (m²);
- T₀ – Tempo de reverberação de referência (= 0,5 s no interior de locais).

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \cdot \log \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot T_0} \quad (2.19)$$

Sendo:

- D_{2m, nT,w} – Isolamento sonoro a ruído de condução aérea, padronizado, com o exterior (dB);

- R'_w – Índice de redução sonora aparente, *in situ* (dB);
- V – Volume do compartimento recetor (m^3);
- S – Área da superfície de separação (m^2);
- T_0 – Tempo de reverberação de referência (= 0,5 s no interior de locais).

2.5.3. RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Os ruídos de percussão são transmitidos por meio de uma solicitação mecânica direta sobre o elemento construtivo. Uma vez que os vários elementos construtivos estão ligados entre si, a vibração resultante dessa solicitação vai-se propagar rapidamente entre todos os elementos do edifício, podendo causar uma sensação de incomodidade entre os utilizadores (figura 2.16). [1]

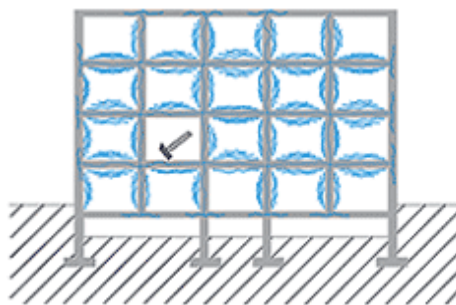


Figura. 2.16. - Transmissão de ruídos de percussão. [26]

A figura 2.17 apresenta alguns exemplos de fontes de ruído de percussão mais correntes em edifícios. A origem deste ruído pode ser causada por impacto, onde são exemplos o bater de portas, martelar, dar passos, saltar ou queda de lixo em condutas. Para além destes, existe ruído com origem em fontes estáticas, tais como o sistema de bombagem, ar condicionado, ventoinhas ou máquinas de lavar [1]



Figura. 2.17. - Situações correntes de criação de ruído de percussão [1]

Sobre os ruídos de percussão, as melhores formas de atuar passam por atuar sobre os revestimentos ou na continuidade dos elementos de ligação, de forma a minimizar a propagação do estímulo sonoro. A aplicação de revestimento por alcatifa, solução em “teto falso”, constituído por material absorvente na caixa de ar e suspensores antivibráticos ou uma solução como laje flutuante (figura 2.18) são algumas das formas de maximizar o isolamento sonoro a ruídos de percussão [1]

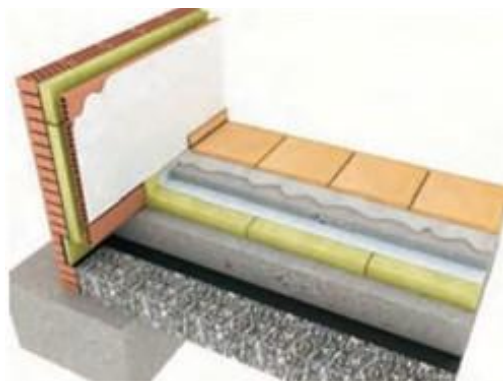


Figura. 2.18. - Laje Flutuante. [27]

Tal como os ruídos de condução aérea, a medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão também pode ser feita em laboratório, sem o efeito das transmissões marginais, ou *in situ*. A expressão 2.20 quantifica o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão é dada por:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \cdot \log \frac{T}{T_0} \quad (2.20)$$

Sendo:

- L'_{nT} – Nível de pressão sonora padronizado para um tempo de reverberação do compartimento recetor T_0 (dB);
- L_i – Nível de pressão sonora medido no compartimento recetor (dB);
- T – Tempo de reverberação do compartimento recetor (s);
- T_0 – Tempo de reverberação de referência (=0,5 s).

2.6. PERCEÇÃO DA PALAVRA

2.6.1. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Define-se inteligibilidade da palavra como o grau de entendimento das palavras corretamente ouvidas pelo recetor face às emitidas pelo emissor e está relacionada com as condições do espaço, sendo que um elevado tempo de reverberação e ruído de fundo obrigam a que o emissor eleve o tom de voz, afetando a percepção da palavra, assim como a capacidade em escutar, concentrar ou aprender. A variabilidade da emissão da voz pode ser analisada sob quatro pontos de vista [1]

- Frequência;

- Intensidade;
- Duração;
- Direccionalidade.

No que toca à frequência, as palavras apresentam uma vasta gama de frequências. As vogais podem apresentar frequências na ordem dos 150 a 300 Hz, enquanto as consoantes correspondem a frequências compreendidas entre os 3500 e os 7000 Hz.

Em termos de intensidade e duração, as vogais são emitidas com um nível de pressão sonora mais elevado que as consoantes, sendo a diferença de 28 dB entre a vogal de som mais fraco e de maior intensidade. Para além da intensidade, as vogais também se estendem por um maior período de tempo, sendo emitidas em média com uma duração de 90 ms, enquanto as consoantes em cerca de 20 ms. [1]

Em relação à direccionalidade, a voz humana não emite de igual maneira em todas as direções, sendo emitida preferencialmente para a frente do emissor, mas com variabilidade direcional em função da frequência. Através da figura 2.19 é possível verificar que as baixas frequências apresentam pouca variabilidade em relação à direção (-5 dB p/ -180°), enquanto as altas frequências podem perder quase 25 dB com a direção de escuta. [1]

As vertentes mais importantes da variabilidade da emissão da voz encontram-se no quadro 2.3.

Quadro 2.3. Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [Adaptado de 1]

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	Baixa (150 – 300Hz)	Elevado	≈90 ms	-5 dB p/ -180°
Consoantes	Alta (3500 -7000 Hz)	Baixo	≈20 ms	-20 dB p/ -180°

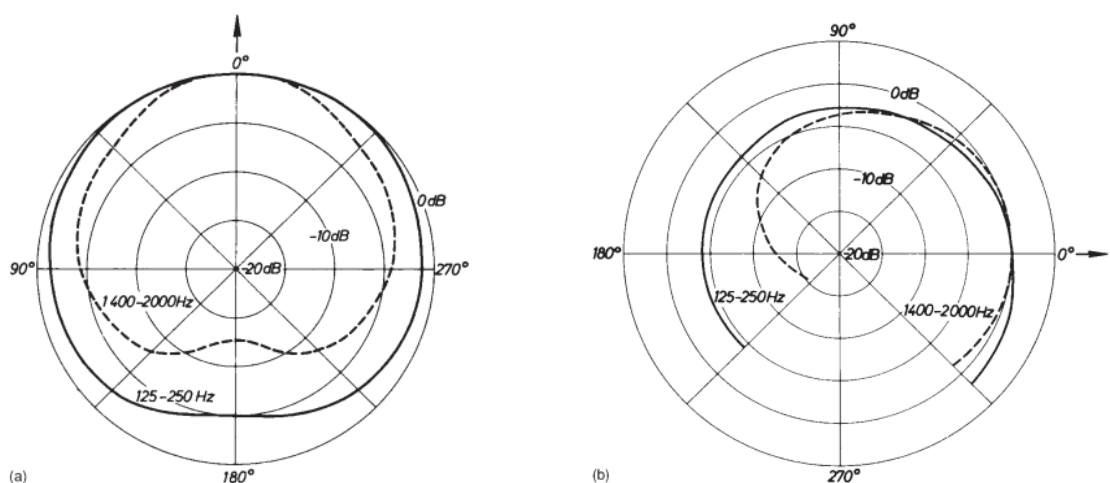


Figura. 2.19. - Contorno da emissão da palavra. A) plano horizontal; B) Plano vertical. [28]

2.6.2. PARÂMETROS DE MEDIDA

2.6.2.1. Parâmetros subjetivos e objetivos

Os parâmetros de medida da inteligibilidade da palavra são divididos em testes subjetivos e em testes objetivos. Os testes subjetivos correspondem à leitura de frases ou palavras para um grande número de pessoas que as escrevem. Os resultados obtidos são dependentes da intervenção do ser humano, o que leva a um carácter subjetivo e o maior grau de acerto indica uma maior inteligibilidade do local [1]. De entre os testes subjetivos destacam-se o PB (*Phonetically Balanced words*) e os testes MRT (*Modified Rhyming Tests*).

Os testes objetivos não necessitam da intervenção humano e são realizados por aparelhos, o que levam a resultados mais precisos e com menor probabilidade de ocorrência de erros. São exemplo deste tipo de grupo:

- AI (*Articulation index*);
- SIL (*Speech Interference Level*);
- AC (*Articulation class*);
- STI e RASTI (*Speech Transmission Index* e *Rapid Speech Transmission Index*).

2.6.2.2. Índice de Articulação

O índice de articulação (AI) é um teste objetivo que corresponde à diferença entre o nível de conversação de referência (nc) e o ruído de fundo medido no local (rf) que, depois de multiplicados por um peso (p) atribuído de acordo com a importância de cada banda de frequência, se adiciona e divide o resultado por 10.000, resultando no AI, como mostra o quadro 2.4. Em função dos valores de AI é possível obter uma percepção do grau de inteligibilidade e privacidade, através do quadro 2.5.

Quadro 2.4. Obtenção do parâmetro AI [1]

Frequência (Hz)	Nível Conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de Fundo em dB (rf)	Direccionalidade	nc-rf (máx. 30)	(nc-rf). p
250	72	18				
500	73	50				
1000	78	75				
2000	63	107				
4000	58	83				
						$\Sigma =$
						$AI = \frac{\Sigma}{10.000}$

Quadro 2.5. Perceção do grau de inteligibilidade e privacidade em função dos valores de AI [1]

AI (índice de articulação)	Grau de privacidade	Grau de inteligibilidade
< 0,05	Confidencial	Nula
[0,05 – 0,20[	Normal privacidade	Muito fraca
[0,20 – 0,35[	Marginal	Fraca
[0,35 – 0,40[	Pobre	Sofrível
[0,40 – 0,65 [	Em geral, sem privacidade	Boa
≥ 0,65	Privacidade totalmente inexistente	Excelente comunicação (p/ conferências, aulas, etc)

2.6.2.3. SIL - Interferência na conversação

O SIL (*Speech Interference Level*) é usado para a caracterização do grau de interferência na conversação e é definido como a média aritmética dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (RF) nas bandas de oitava dos 500 Hz aos 2.000 Hz.

$$SIL = \frac{RF_{500Hz} + RF_{1kHz} + RF_{2kHz}}{3} \text{ (dB)} \quad (2.21)$$

O quadro 2.6 apresenta os valores limite de SIL para os quais a comunicação verbal é possível, dependentes da distância entre orador e emissor, do esforço de voz e do género (masculino e feminino). Se o valor de SIL ultrapassar os limites do esforço de voz “gritando”, é impossível a existência de qualquer tipo de comunicação verbal.

Quadro 2.6. Valores limite de SIL para o qual a comunicação da palavra é possível [1]

Distância (m)	Esforço de Voz							
	Normal		Elevado		Muito alto		Gritando	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0,3	68	63	74	69	80	75	86	81
1,0	58	53	64	59	70	65	76	71
2,0	52	47	58	53	64	59	70	65
3,0	48	43	54	49	60	55	66	61
4,0	46	41	52	47	58	53	64	59

2.6.2.4. STI e RASTI

O STI (*Speech Transmisssion Index*) foi desenvolvido para a avaliação da inteligibilidade da palavra em locais ruidosos ou com reverberação. Este método começa pelo cálculo da função de transferência de modulação (MTF – *Modular Transfer Function*), que vai determinar a redução da modulação entre o emissor e o recetor. O cálculo do STI é feito através da medição das MTF's, divididas em catorze frequências de modulação, em cada uma das sete bandas de oitava, desde os 125 aos 8000 Hz, o que vai resultar em 98 medições distintas [29]

Dada a complexidade do método, tem pouca aplicabilidade prática e implica muito tempo despendido, surgiu o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) surge como uma simplificação do cálculo do STI, que trabalha apenas em duas bandas de frequência, 500 e 2000 Hz, em nove frequências de modulação. Através de relações sinal – ruído e da média entre os valores respetivos, é obtido um valor compreendido numa escala de zero a um, como mostra o quadro 2.7. Como este método é apenas uma simplificação do STI, não deve ser utilizado quando o tempo de reverberação for muito longo, em função da frequência, ou na presença de distorções do som não lineares [29]

Quadro 2.7. Classificação STI / RASTI [30]

STI / RASTI	[0 – 0,30[	[0,30 – 0,45[	[0,45 – 0,60[	[0,60 – 0,75[	[0,75 – 1]
Inteligibilidade da palavra	Má	Pobre	Razoável	Boa	Excelente

2.7. REFLEXÕES E GEOMETRIA DO ESPAÇO

A reflexão corresponde à mudança da direção do som, mantendo as mesmas características, como o comprimento de onda, velocidade de propagação, frequência e o ângulo de incidência, depois ter incidido sobre o elemento de separação. Se a superfície possuir irregularidades, o som vai refletir-se em todas as direções, o que leva ao fenómeno da difusão. O tamanho das irregularidades vai condicionar as frequências de onda refletidas, sendo que superfícies de pequenos relevos serão difusas para altas frequências. [1]

A reflexão do som numa superfície pode levar à ocorrência de dois fenómenos: a reverberação e o eco. A reverberação (estudada em 2.3) é o tempo, em segundos, que o nível de pressão sonora demora a decair, a partir do momento que a fonte sonora deixa de emitir. Os ecos (figura 2.20), são definidos por reflexões que chegam bastante atrasadas e são perceptíveis pelo ser humano, desde que a diferença temporal seja de superior a 50 ms, sendo prejudicial para o ambiente acústico de grandes salas ou auditórios. Um outro caso de ecos, (ecos repetidos - *flutter echo*), são causados pela reflexão consecutiva do som entre duas paredes paralelas próximas entre si.

O tratamento para qualquer defeito acústico vai depender da função da sala e da envolvente. Em salas de concerto, a melhor forma de evitar que o som direto, oriundo do palco, atinja o teto, passa pela colocação de discos voadores (figura 2.21), suspensos a uma altura inferior à do teto, de forma a que o som seja difundido por todo o espaço sem a ocorrência do fenómeno do eco. Em salas de aula, auditórios, refeitórios ou corredores, é comum a colocação de material absorvente nas paredes e teto ou a adoção de soluções como teto falso, que leva à redução do tempo de reverberação. Mudança no ângulo de superfície ou reorientação de superfícies são outras formas de evitar ecos.

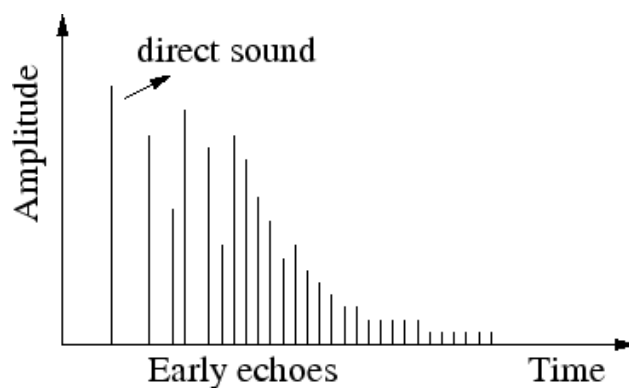


Figura. 2.20. – Reflectograma com presença de eco. [31]

Em situações de acústica variável, em que o espaço é adaptado para diversos usos, o tratamento pode passar pela variação na absorção, através de mecanismos mecânicos ou manuais, tais como cortinas de veludo ou painéis, que através da sua colocação e mudança de ângulo é possível funcionar como um absorvente ou como refletor. A outra maneira passa pela mudança do volume da sala, que vai variar o valor do tempo de reverberação. Como exemplo, a “concha de orquestra” (figura 2.22), usual em salas de espetáculos, reflete o som do palco de volta para a audiência.

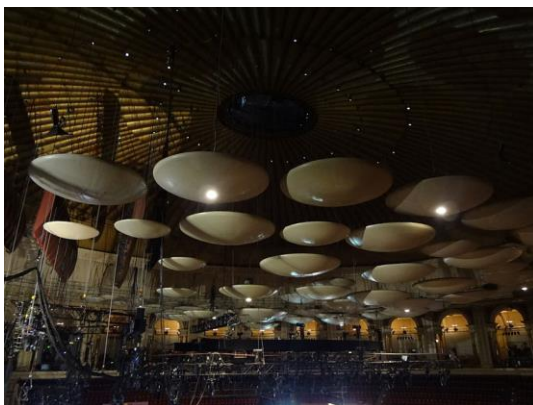


Figura. 2.21. – Discos voadores, caso do Royal Albert Hall, Londres [32]



Figura. 2.22. – Exemplo de concha orquestra, Palácio de Cristal, Porto [33]

3

ESTADO DA ARTE

3.1. A ACÚSTICA EM INFANTÁRIOS

Em 1909, o médico Étienne Lombard apresentou o conceito de *Efeito Lombard*, que é definido como o reflexo involuntário das pessoas, que aumentam a intensidade da palavra, resultando num aumento da relação sinal/ruído, de forma a que não seja mascarado pelo excessivo ruído de fundo presente num espaço [34].

Na década de 1940, Hartman [35] concluiu, com base em estudos realizados a partir de 1930, que elevados níveis de ruído de fundo em salas de aula têm um impacto negativo nas crianças, principalmente na realização de atividades que requerem maior esforço mental, apesar que no caso de crianças mais motivadas, o nível de sucesso mantém-se, independentemente das condições acústicas.

Em 1947, French e Steinberg [36] formularam a primeira definição do índice de articulação (AI – *Articulation Index*), de forma a quantificar a inteligibilidade da palavra em sistemas de transmissão telefónicos, onde o ruído e a reverberação são das principais causas para a perda de inteligibilidade. O AI é baseado em função da relação sinal/ruído num conjunto de 20 bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz, todas de igual importância para a definição desse mesmo índice. Em cada uma das bandas é medida a inteligibilidade da palavra, sendo o resultado final uma média ponderada entre todos os valores obtidos em cada banda. Atualmente o AI, abordado em 2.6.2.2, é também denominado de SII (*Speech intelligibility index*), tem como definição e cálculo conforme a norma ANSI S3.5-1997 [37]

Durante o ano de 1949 [38] foi levado a cabo um estudo que aborda o problema da influência da reverberação na determinação da inteligibilidade da palavra. Através da leitura de 400 palavras de 40 frases, para cada nível de ruído de fundo, os autores estudaram dois tipos de efeitos: “sobreposição”, e “disfarce”. Neste estudo, os autores obtiveram valores de AI (figura 3.1) semelhantes a valores experimentais calculados por outros autores durante a década de 1930, até tempos de reverberação na ordem dos 2 s, permitiram concluir que a reverberação tem influência negativa na qualidade e na perceção da palavra, uma vez que reduz a amplitude associada às frequências relativas à palavra e num aumento da energia nas baixas frequências, que resulta no encobrimento nas frequências mais altas.

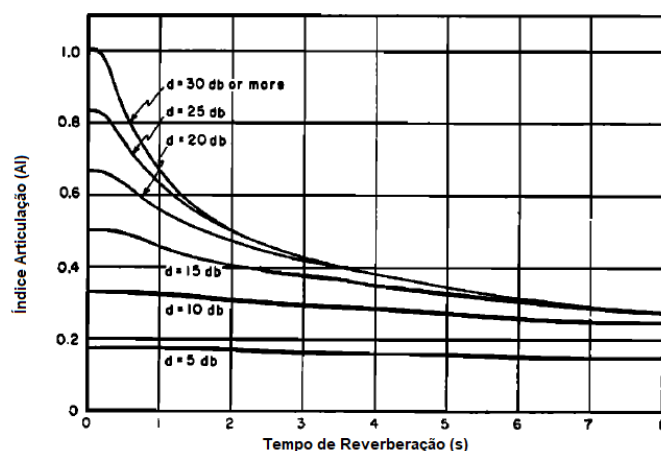


Figura. 3.1. – Índice de articulação em função do tempo de reverberação para diferentes níveis de ruído de fundo. [38]

No mesmo ano, Beranek [39] publica o livro “*Acoustic Measurements*”, que serviu como referência para alunos do ensino superior e pessoal afeto ao campo da Acústica. Esta obra explica detalhadamente matérias relacionadas com medições acústicas, faz referência a aparelhos, equações matemáticas associadas a cada parâmetro acústico e uma descrição e comparação das vantagens e desvantagens das mesmas. Nessa obra, o autor apresenta no capítulo relativo ao estudo do tempo de reverberação, um quadro (quadro 3.1) que mostra as diferenças nos valores do tempo de reverberação, para 11 auditórios em várias cidades suíças, consoante a frequência, medida em ciclos por segundo (cps), e o volume do espaço.

Quadro 3.1. Tempo de reverberação em função do volume e frequência. [adaptado de 39].

Auditório	Volume (m ³)	Tempo de reverberação médio (s)		
		100 cps	800 cps	4800 cps
Zurique	4500	2,74	1,64	1,45
Genebra	3500	2,87	1,48	1,50
Basileia	2070	3,00	1,41	1,49
Basileia 2	660	1,96	0,97	1,01
Lugano 3	297	0,76	0,62	0,60
Genebra (3)	243	0,84	0,70	0,73
Zurique 8	53	0,46	....	....
Berna	40	3,60	4,33	1,76

No ano de 1954, Beranek [40] publica um dos principais livros dentro do campo da Acústica, que continua a ser citado nos dias de hoje e foi alvo de revisões em 1986 e 2012. A obra *Acoustics*, foi um dos principais guias para estudantes e engenheiros, onde abordam os princípios fundamentais da Acústica, como as leis de produção, radiação e propagação do som e focando também nas questões relacionadas com a eletroacústica, tais como o comportamento de transdutores, análise de equipamentos como microfones, altifalantes, auscultadores e no estudo do som em espaços fechados, tais como salas de aula, escritórios, auditórios ou salas de estar.

Também em 1954, Korm [41], procedeu a estudos para avaliar a influência do ruído de fundo no nível de pressão sonora da palavra num espaço, onde foram realizadas, num grupo de 50 homens e mulheres entre os 20 e 60 anos de idade, medições que consistiam na leitura de frases, enquanto a fonte a sonora emitia ruído de fundo, sendo no final registados os valores relativos ao aumento do nível da palavra, em dB. Neste estudo o autor concluiu que o ruído de fundo até 45 dB não interfere com a intensidade da palavra, não conduzindo ao Efeito Lombard [36] e que a partir dos 55 dB, a intensidade da palavra subia a uma taxa de 0,38 dB/dB, o que demonstra o impacto negativo do ruído de fundo.

Em 1963, Fitzroy e Reid [42] realizaram medições em 37 escolas, espalhadas nos EUA, com objetivo de definir critérios acústicos para a conceção de salas de aula, tais como isolamento acústico ou níveis de ruído de fundo. Para cada escola foram medidos o tempo de reverberação, índice articulação, ruído de fundo e a redução sonora. Os resultados, para algumas dessas escolas, encontram-se sintetizados no quadro 3.2.

Quadro 3.2. Resumo das medições acústica realizadas em cada escola, nos EUA, segundo Fitzroy e Reid [adaptado de 42].

Escola	Volume (m ³)	Tempo Reverberação (s)		Ruído de Fundo (dB)		SIL (dB)	Índice Articulação (AI)
		Obtido	Ótimo	C/ ocupação	S/ Ocupação		
3/EC	230	1,05	0,66	67	62	48	0,24 – 0,46
3/MW	207	0,47	0,64	64	45	42	0,48
5/MW	233	0,57	0,67	63	61	47	0,39
1/MW	439	1,68	0,68	64	61	41	0,52
4/MW	305	1,13	0,71	69	67	51	0,32
1/EC	229	0,71	0,66	65	62	53	0,01
4/EC	146	0,88	0,58	66	60	49	0,01
6/EC	213	1,17	0,65	69	52	49	0,01
6/MW	211	0,60	0,65	67	65	50	0,02
7/MW	344	0,63	0,73	66	62	47	0,01
1/SW	130	0,50	0,56	61	60	45	0,01
3/SW	152	0,96	0,59	71	69	57	0,01

Anos mais tarde, Kingsbury e Taylor [43], desenvolveram um guia para a conceção acústica de salas de aula, onde foram focadas as questões do controlo do ruído e da inteligibilidade da palavra. Com base nos valores obtidos no relatório de Fitzroy e Reid de 1963 [42], indicados no quadro 3.3, os autores sugeriram recomendações a aplicar em cada um dos exemplos.

Durante o ano de 1969, Kingsbury e Strumpf [44] estudaram a inteligibilidade da palavra em três salas de aula retangulares, de diferentes volumes, localizados na Universidade da Pensilvânia. Os testes, feitos em estudantes, consistiam em *Modified Rhyme Test* (MRT), onde a partir da análise estatística dos resultados, foi concluído que o tipo de ensaio realizado era adequado para a determinação da inteligibilidade da palavra; não se verificaram diferenças de inteligibilidade entre os estudantes do sexo masculino e feminino e que a atenuação do sinal sonoro dentro da sala de aula apresenta um comportamento logarítmico.

A partir dessas conclusões, foram definidos alguns critérios, baseados no ruído de fundo e nos tempos de reverberação medidos nas três salas, apresentados no quadro 3.4.

Na década de 1970, Crum (1974) [45] estudou os efeitos do ruído, reverberação e na distância em relação à fonte sonora em adultos na percepção de palavras monossilábicas. O teste consistiu na leitura de 10 listas com cerca de 50 palavras cada, dentro de uma sala, com a fonte sonora a emitir a 70 dB. Nesse mesmo teste também foram variados o tempo de reverberação, a distância à fonte sonora e a relação sinal/ruído. Através dos resultados dos ensaios, (quadro 3.5), o autor concluiu que:

- A distância não influencia para tempos de reverberação nulos (condições anecoicas);

- Em espaços mais reverberantes, a percepção da palavra reduziu significativamente com o aumento da distância, principalmente entre os 2 e 4 m, apesar de não se verificarem diferenças entre os 4 e 8 metros;
- Foi verificado para condições em que a relação sinal/ruído em situação de silêncio ($S/N = +\infty$), a percepção da palavra não mudou para tempos de reverberação entre os 0 e 0,8 s; no entanto, a partir dos 1,2, a percepção reduziu drasticamente;
- A combinação de todos os parâmetros referidos anteriormente causa uma degradação significativa da percepção da palavra.

Quadro 3.3. Resumo das medições acústica realizadas em cada escola nos EUA, segundo Kingsbury e Taylor. [adaptado de 43].

Escola	Volume (m ³)	Tempo Reverberação		Índice Articulação (AI)	Ruído de fundo (dB)	Recomendações dos autores
		obtido (s)	ótimo (s)			
3/EC	230	1,05	0,66	0,24 – 0,46	62 – 67 (NC-47)	Redução do ruído de fundo para uma classe NC-40, permite um aumento de AI até 0,71.
3/MW	207	0,47	0,64	0,48	45 – 64 (NC-42)	Redução do ruído de fundo para NC-37 ou NC-35 permite chegar a um tempo de reverberação próximo do ótimo e a um AI igual a 0,72.
5/MW	233	0,57	0,67	0,39	61 – 63 (NC-47)	Redução do ruído para NC-35, obtendo um AI = 0,76, permite manter valores de AI entre salas de aula abaixo de 0,01.
4/MW	305	1,13	0,71	0,32	67 - 69 (NC-51)	Redução do ruído para NC-38, permite um AI igual a 0,70, apesar que entre salas de aula vai existir um aumento de AI até 0,09.

Quadro 3.4. Resumo das medições acústicas realizadas em cada uma das salas na Universidade da Pensilvânia. [adaptado de 44].

Sala	Volume (m ³)	Tempo de Reverberação (s)		Ruído de fundo (dB)	
		Condições Iniciais	Aplicação de placa de gesso	S/ocupação	C/ocupação
209	187	0,38	-	34	52 – 82
312	560	0,52	0,63	34	49 – 79
402	560	0,39	0,47	32	52 – 82

Quadro 3.5. Resultados médios dos testes de percepção da palavra para S/R, tempo de reverberação e distância, segundo Crum. [adaptado de 45].

S/N (dB)	Distância à fonte sonora (m)	Tempo de Reverberação (s)			
		0,0	0,4	0,8	1,2
Silêncio	2	100 %	100 %	98 %	98 %
	Entre 4 a 8 m	100 %	99 %	96 %	94 %
+6 dB	2	81 %	77 %	71 %	66 %
	Entre 4 a 8 m	81 %	71 %	61 %	57 %
0 dB	2	46 %	41 %	41 %	25 %
	Entre 4 a 8 m	50 %	37 %	31 %	22 %

Em 1979, Gelfand e Silman [46] examinaram o efeito da reverberação em salas de pequenas dimensões através do reconhecimento de palavras em 20 indivíduos com audição normal. Os testes consistiam em na audição de 5 consoantes iniciais e finais, numa ordem aleatório, emitidos a um nível de pressão sonora de 50 dB, onde a sala foi adaptada para representar situações de muita e pouca reverberação. Os resultados, (quadro 3.6), mostraram que em condições de pouca reverberação, a percepção da palavra é superior à situação de elevada reverberação e que a percepção das consoantes iniciais apresentou melhores resultados que as consoantes finais, facto justificado pelas múltiplas reflexões presentes na sala.

Quadro 3.6. Percentagem média correta dos testes de percepção, mais desvio padrão, das consoantes iniciais e finais. [Adaptado de 46].

Condições de Reverberação	Consoante inicial	Consoante final
Silêncio	98,80 ± 1,15	94,36 ± 3,73
Muita reverberação	93,36 ± 4,74	84,48 ± 5,10

Em 1981, Houtgast [47] conduziu testes, baseados na audição de palavras monossilábicas, para avaliar a influência do ruído proveniente de fatores externos, como o tráfego rodoviário, no nível sonoro da voz dos professores. Os resultados mostraram que o ruído externo reduz de forma significativa, com cerca de 50 % respostas corretas quando o S/R atingiu valores inferiores a +15 dB(A). Através desses resultados, o autor concluiu os seguintes pontos:

- A inteligibilidade da palavra é dependente das condições acústicas do espaço;
- O ruído externo vai obrigar a um aumento do nível sonoro emitido pelos professores, em cerca de 20 % em relação ao ruído dentro da sala de aula;
- De forma a obter 100 % nos testes de inteligibilidade da palavra, é necessário S/N de +15 dB;
- De forma a que um adulto consiga entender o discurso, o S/N tem de estar compreendido entre + 6 e +10 dB.

Durante o ano de 1986, Crandell e Bess [48] estudaram o efeito conjunto da reverberação e do ruído de fundo na percepção da palavra em salas de aula, através da realização, em 20 alunos entre os 5 e 7 anos, de testes que consistiam na audição de 30 frases. Os resultados indicaram que os alunos obtiveram bom desempenho no reconhecimento de palavras (89 % correto) quando os testes eram realizados a 2 m da fonte sonora. No entanto, quando os estudantes se encontravam a 8 m, o desempenho diminuiu em 36 %. O estudo também permitiu concluir que a percepção da palavra começa a degradar a partir de tempos de reverberação acima de 0,5 s, para a maioria dos ouvintes em espaços educacionais.

No mesmo ano, Bradley [49] conduziu a medições de parâmetros acústicos em 10 salas de aula e em testes relacionados com a inteligibilidade da palavra, obtidos através do *Fairbank Rhyme Test* e em variações do nível sonoro da fonte sonora, em alunos entre os 12 e 13 anos de idade, de forma a avaliar a adequabilidade acústica desses espaços. Os resultados indicaram que o tempo de reverberação mínimo de 0,4 s não afeta a inteligibilidade, sendo que a partir desse valor, a inteligibilidade decresce em 14% por cada 1 segundo adicional de TR. Através da combinação dos efeitos de TR da relação sinal/ruído, permitiu concluir que, para garantir condições de inteligibilidade, serão necessários os valores mínimos de tempo de reverberação e de S/R de 0,4 s e de +15 dB(A). Os quadros 3.7 e 3.8 apresentam um resumo dos resultados obtidos durante o ensaio.

A partir desses resultados, o autor estimou quais as condições ideais a obter em salas de aulas, que permitem uma inteligibilidade da palavra quase perfeita, ajustada a todos os grupos etários, obtendo valores ótimos de TR entre os 0,4 e 0,5 s e o ruído de fundo que não deve exceder os 30 dB(A).

Num estudo levado a cabo em 13 escolas primárias em várias localidades no Reino Unido, Airey e Mackenzie (1999) [50] avaliaram as condições acústicas de cada escola e o correspondente grau de satisfação dos professores, antes e após tratamento acústico. Nessa publicação, os autores reportaram que os professores em salas de aulas com maiores tempos de reverberação têm maior propensão para ficar doentes em relação aos professores que trabalham em salas de menor reverberação. Graças ao tratamento acústico, através da colocação de material absorvente no teto, foi verificado uma redução do tempo de reverberação médio de 0,7 para 0,4 s e do ruído de fundo de 45 para 40 dB, justificado pelo efeito conjunto do material absorvente e da redução da reverberação. Apesar de não terem sido realizados testes objetivos para a medição da inteligibilidade da palavra, uma análise subjetiva, através do *feedback* dos professores e alunos, os autores concluíram que o tratamento acústico melhorou a comunicação e um aumento do desempenho escolar dos alunos.

Quadro 3.7. Resultados médios dos vários parâmetros acústicos nas 10 salas de aula, em Ottawa [Adaptado de 49].

Características	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão
Volume (m ³)	253	312	529	81,8
Distância à fonte sonora (m)	2,86	4,72	8	1,44
Ruído de fundo (dB(A))	38,4	41,9	45,1	2,10
Tempo de reverberação (s)	0,39	0,72	1,20	0,26
Clareza (C ₈₀ , dB)	0,61	7,08	13,38	3,41

Tempo de decaimento curto (EDT, em s)	0,38	0,71	1,24	0,26
---------------------------------------	------	------	------	------

Quadro 3.8. Inteligibilidade da palavra média para níveis sonoros de 40 e 50 dB(A) nas 10 salas de aula [Adaptado de 49].

Salas	Inteligibilidade da palavra	
	Fonte sonora a 40 dB(A)	Fonte sonora a 50 dB(A)
1	0,55	0,81
2	0,80	0,96
3	0,81	0,97
4	0,68	0,91
5	0,70	0,91
6	0,65	0,95
7	0,75	0,88
8	0,70	0,90
9	0,78	0,97
10	0,42	0,96

Também em 1999 foram avaliadas as condições acústicas em 18 salas de aula localizadas na Nicarágua [51], concebidas para crianças com dificuldades auditivas, comparando os requisitos acústicos como o ruído de fundo, tempo de reverberação e relação sinal/ruído com os limites regulamentares. Os testes foram divididos em duas partes: questionários para a definição das características físicas de cada escola e as medições dos vários parâmetros acústicos (quadro 3.9 para alguns desses exemplos). Os resultados indicaram que os tempos de reverberação excedem as recomendações e que apresentam valores inconsistentes nas várias bandas de frequência e que apenas 18% das salas estudadas se encontravam dentro dos limites especificados da relação sinal/ruído.

Quadro 3.9. Resumo das medições acústica realizadas em cada escola [Adaptado de 51].

Escola	Ruído de Fundo (dB(A))		Tempo reverberação médio (500, 1000, 2000 Hz) (s)	Nível médio sonoro do sinal (dB(A))	Nível médio sonoro do ruído (dB(A))	Relação Sinal Ruído (dB(A))
	Com ocupação	Sem ocupação				
1 – Chinandega	47,7	70,8	0,7	61,3	67,9	- 6,6
2 – Cidade Darío	46,9	74,9	1,5	65,1	78,9	- 13,8
3 – El Viejo	49,5	73,1	0,8	78,0	77,8	+ 0,2

4 – Estelí	40,7	60,5	0,9	73,6	62,1	+ 11,5
5 – Granada	50,1	59,0	1,3	75,5	59,7	+ 15,8
6 – Jinotega	46,5	63,9	1,3	70,5	71,0	- 0,5
7 - Matagalpa	50,4	61,0	1,7	70,5	60,5	+ 10,0
8 – Puento Cabezas	49,0	64,7	1,8	63,4	61,8	- 1,6
9 – Rivas	52,5	61,3	1,5	64,5	64,9	-0,3
10 – Bluefields	50,7	61,8	0,9	75,4	67,8	+7,5
18 – Ocotal	38,1	56,5	1,0	69,9	53,5	+16,4
Valores médios	49,6	66,5	1,2	69,7	67,5	+1,9
Valores ideais	40,0	50,0	0,5		+10	

Com recurso a investigações realizadas ao longo do século XX por diversos autores, Crandell e Smaldino (2000) [52] publicaram um artigo que aborda a influência de vários parâmetros acústicos (reverberação, ruído e distância em relação ao orador) na inteligibilidade da palavra em crianças. Relativamente a esses parâmetros os autores concluíram:

- O ruído de fundo tem um impacto negativo nas crianças ao afetar a capacidade da criança em entender o discurso proveniente do professor, uma vez que o ruído mascara as características acústicas e linguísticas relacionadas com a mensagem transmitida;
- Excessivo ruído de fundo leva a relações sinal/ruído desfavoráveis, onde os valores podem variar entre + 5 e -7 dB e afeta o desempenho, concentração e atenção em crianças, principalmente em crianças com baixo QI ou com elevados índices de ansiedade; os professores têm uma maior probabilidade de ocorrência de problemas vocais, consequência na subida no nível da voz para ultrapassar os efeitos do ruído existente na sala de aula;
- Elevados tempo de reverberação afetam a inteligibilidade da palavra ao mascarar o som direto pelo fenómeno de sobreposição, que tem efeitos na perceção das consoantes, dado que as vogais apresentam maior intensidade e duração, levando a que as consoantes tornem menos evidentes;
- A distância da criança ao professor influencia a perceção da palavra. A partir de uma certa distância, as reflexões sofridas no som direto reduzem a perceção, principalmente se o espaço for constituído por bastantes elementos refletoras, conduzindo a uma mudança da intensidade do som refletido que influencia a perceção do som direto.

Tendo em conta estes aspetos, os autores definiram valores ideais a obter em salas de aula de forma a que comunicação e a perceção ocorram sem problemas. (quadro 3.10)

Quadro 3.10. Valores ideais a obter em salas de aula, segundo Crandell e Smaldino [Adaptado de 52].

Tempo de reverberação (s)	Ruído de fundo (dB(A))	Relação Sinal / Ruído (S/R) (dB)
0,4 – 0,6	30 – 35	+15

Em 2001, Picard e Bradley [53] realizaram uma revisão relacionada com a inteligibilidade da palavra em salas de aulas de vários tipos de edifícios escolares, onde registaram os valores do ruído de fundo e do nível sonoro da voz dos professores (figuras 3.2 e 3.3), através de estudos realizados ao longo dos anos por outros autores, que permitiram chegar à conclusão que as salas de aulas com crianças mais novas têm tendência a serem mais ruidosas, principalmente em infantários, situação que tende a diminuir com o passar da idade.

Nesse estudo, os autores também procederam a medições de vários parâmetros acústicos em salas de aulas de escolas primárias no Canadá, de forma a avaliar a adequabilidade dos mesmos face aos valores ideais propostos pelo autor. O quadro 3.11 mostra os resultados dos ensaios, que comprovam que as salas de aula apresentam valores acima do desejável.

Quadro 3.11. Comparação os valores medidos e os valores ideais a obter em salas de aula, segundo Bradley e Picard [Adaptado de 53].

Salas de aula de escolas primárias	Tempo de reverberação (s)	Ruído de atividade (dB(A))	Relação sinal/ruído (S/R) (dB)
Valores medidos	0,7 -1,2	51,7 – 75	-4,5 - +23
Valores ideais	0,4 -0,9	30 – 40	Não especificado

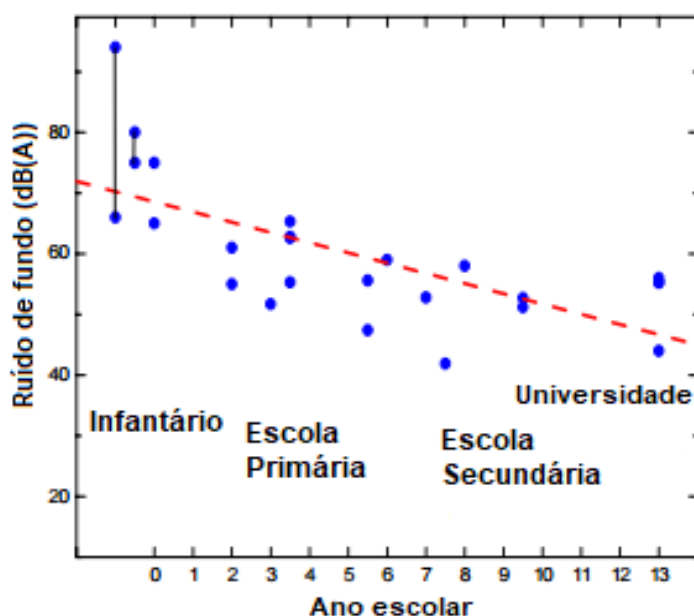


Figura. 3.2. – Ruído de fundo registado em salas de aula, registados em estudos anteriores, segundo Bradley e Picard. [Adaptado de 53]

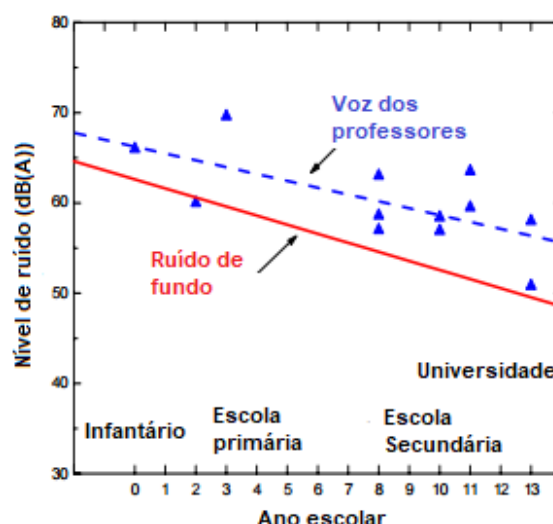


Figura. 3.3. – Nível sonoro da voz dos professores, registados em estudos anteriores, segundo Bradley e Picard
[Adaptado de 53]

Durante o ano de 2002, Knecht *et al.* [54] procederam a estudos em 32 salas de aula desocupadas no estado de Ohio, nos EUA, situadas em zonas urbanas, suburbanas e rurais, às quais foram medidos o tempo de reverberação e o ruído de fundo, com o objetivo de comparar os resultados com os limites definidos pelo ANSI S12.60 e para comprovar se é possível prever, de forma precisa, más condições acústicas de uma sala de aula através do estabelecimento de uma lista de parâmetros acústicos. Os resultados, indicados no quadro 3.12 para algumas das escolas analisadas, mostraram que a maioria não estão em conformidade face aos limites do ANSI S12.60, relativos ao tempo de reverberação e ruído de fundo e foi concluído também que criação de uma lista de parâmetros não é ideal para prever situações acústicas, principalmente nas salas de aulas mais reverberantes e ruidosas.

Quadro 3.12. Valores de tempo de reverberação e ruído de fundo para as escolas primárias, em Ohio
[Adaptado de 54].

Escolas	Volume (m ³)	Tempo de reverberação (s)	Ruído de fundo (dB(A))
Rurais			
1a	186	0,7	39
2c	204	1	35
2d	790	1,17	39
Suburbanas			
1a	296	0,4	41
1b	306	0,37	27

2c	240	0,55	38
Urbanas			
1a	250	1,15	42
2b	261	0,6	50
2d	295	0,6	43

Noutro estudo realizado em Londres [55], em 2003, foram realizados inquéritos e medições acústicas (TR, ruído de fundo e STI) em algumas escolas primárias de forma a analisar o ruído interno durante as normais atividades de ensino (quadro 3.13). Os resultados sugerem que os níveis sonoros contínuos equivalentes, L_{Aeq} , (Figura 3.4) das diversas atividades variam entre 55 e 75 dB, correspondentes aos momentos mais silenciosos e ruidosos, concluindo que as crianças são a principal fonte de ruído interno nas salas de aulas e que quanto maior forem os níveis de ruído interno, mais os professores necessitarão de aumentar o nível da voz para atingir níveis aceitáveis de inteligibilidade da palavra na sala de aula.

No que toca ao tempo de reverberação, os tempos variaram entre os 0,3 e os 2 s, o que revela que a maioria das salas de aula analisadas apresentavam valores acima do recomendado, agravando os problemas relacionados com a má inteligibilidade da palavra causados pelo ruído, comprovados pelos valores obtidos de STI, que na maioria dos casos se encontravam entre os 0,5 e 0,6, que confirmam as conclusões acerca da inteligibilidade da palavra

Quadro 3.13. Lista de atividades em sala de aula mais comuns nas escolas primárias em Londres [Adaptado de 55]

Atividades	Descrição
1	Atividades de leitura ou realização de testes;
2	Crianças sentadas enquanto o professor ou outra criança falam em qualquer instante;
3	Crianças a trabalhar individualmente, com alguma conversa;
4	Crianças a trabalhar individualmente, movendo-se em torno da sala de aula, com alguma conversa;
5	Crianças a trabalhar em grupo, sentadas, com alguma conversa;
6	Crianças a trabalhar em grupo, movendo-se em torno da sala de aula, com alguma conversa.

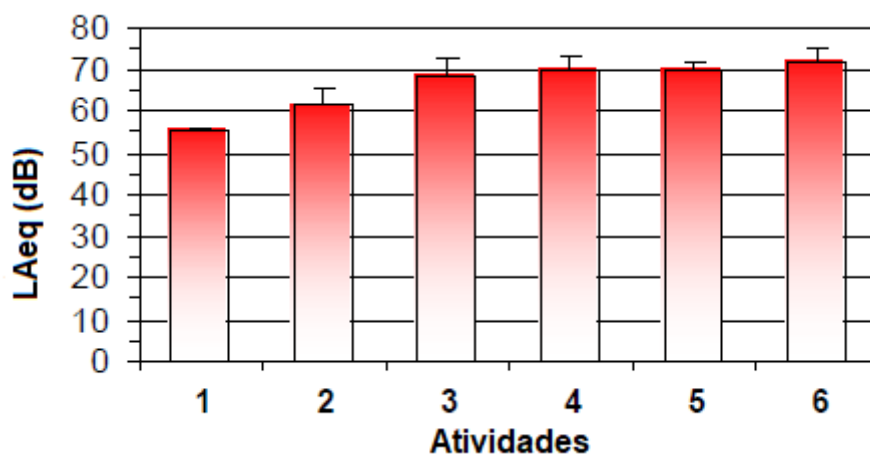


Figura. 3.4. – Níveis sonoros médios das atividades, medidos em 32 salas de aula de escolas primárias em Londres. [Adaptado de 55]

Em 2004, Shield e Dockrell [56] realizaram estudos em várias escolas primárias em três bairros de Londres, com o objetivo de avaliar o efeito do ruído, de origem interna e externa, no desempenho dos estudantes. Para tal, foram medidos o ruído no interior e no exterior das escolas (quadro 3.14), seguido da realização de testes de avaliação padronizados (SATs – *Standardized assessment tests*), constituídos por testes relacionados com capacidade de leitura, escrita, ortografia e matemática, realizados em três diferentes cenários:

- C1 – Condições normais em sala de aula, onde as crianças estão silenciosamente a realizar os testes em silêncio;
- C2 – Crianças a realizar os testes a um nível sonoro constante de 65 dB(A), representando o ruído de uma conversa;
- C3 – Condições semelhantes a C2, com o acréscimo de ruídos intermitentes a um nível de 58 dB(A), de forma a representar o ruído proveniente do exterior.

Os resultados dos testes (quadro 3.15), permitem concluir que os ruídos têm um efeito danoso no desempenho, sendo o ruído proveniente do exterior o mais que causa maior impacto nos resultados dos testes, principalmente nas provas de leitura.

Quadro 3.14. Nível sonoro médio no exterior e no interior das escolas primárias dos bairros A, B e C, em Londres [Adaptado de 56]

Bairro	Nível de ruído (LAeq) (dB)					
	Exterior	Sala de aula c/ ocupação	Sala de aula s/ ocupação	Corredor	Átrio s/ ocupação	Átrio c/ ocupação
A	57,4,					
B	56,2	72,1*	47*	58*	73,4*	53,2*
C	59					

*Valores médios para os três bairros

Quadro 3.15. Resultados dos testes padronizados para os três cenários nas escolas primárias dos bairros A, B e C, em Londres [Adaptado de 56]

Teste	Nota máxima (%)	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Média (%)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão
Leitura	75	33,45	11,62	27,59	12,23	38,48	8,95
Ortografia	15	9,55	3,89	7,18	4,59	11,68	2,75
Aritmética	17	8,00	2,96	6,86	2,74	8,70	2,83
Processamento de informação	75	44,62	21,85	37,35	16,63	30,02	9,14

Um estudo realizado na Polónia [57], em 2006 foi levado a cabo um procedimento para a otimização das condições acústicas de salas de aulas de duas escolas primárias, de forma a controlar parâmetros acústicos como o ruído de fundo, nível sonoro da voz e a relação sinal/ruído, com base na colocação de materiais absorventes sonoros (figura 3.5). A otimização é constituída pelos seguintes passos:

- Formulação do problema de otimização e das possíveis restrições;
- Cálculo dos parâmetros acústicos (relação sinal/ruído, ruído de fundo e nível sonoro da voz) relativos às salas de aulas, para todas as possíveis configurações de colocação de material absorvente;
- Seleção das configurações que satisfaçam as restrições impostas;
- Cálculo do valor médio do parâmetro a otimizar (ruído de fundo ou relação sinal/ruído) para as configurações selecionadas;
- Escolher as soluções com valores médios maiores ou menores que o parâmetro otimizado;
- Seleção da configuração final, tendo em conta o custo.

Uma vez definido o problema, que consiste em maximizar a relação sinal/ruído e cumprir com os limites relacionados com o ruído de fundo da sala de aula e o ruído gerado pela voz dos professores e crianças, foram realizadas medições do ruído de fundo para oito configurações de absorventes sonoros (figura 3.6), de forma a reduzir o número de alternativas. Uma vez escolhidas as alternativas, (opções “L”, “XI” e “XL”), procedeu-se à comparação dos valores de ruído gerado pelos professores e crianças, sendo a solução ótima aquela que tem menor custo e que se encontrava dentro da gama de valores recomendados dos parâmetros acústicos estudados. (figura 3.7).

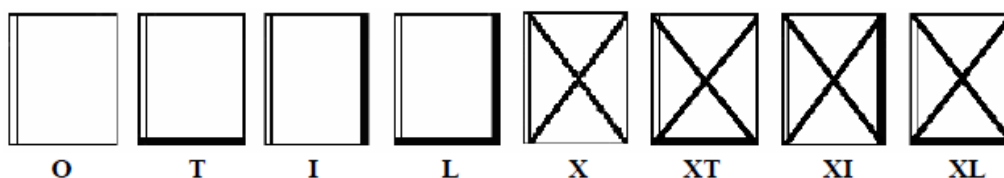


Figura. 3.5. – Esquema das várias configurações de material absorvente a colocar nas paredes e teto, para as duas escolas primárias na Polónia [Adaptado de 57]

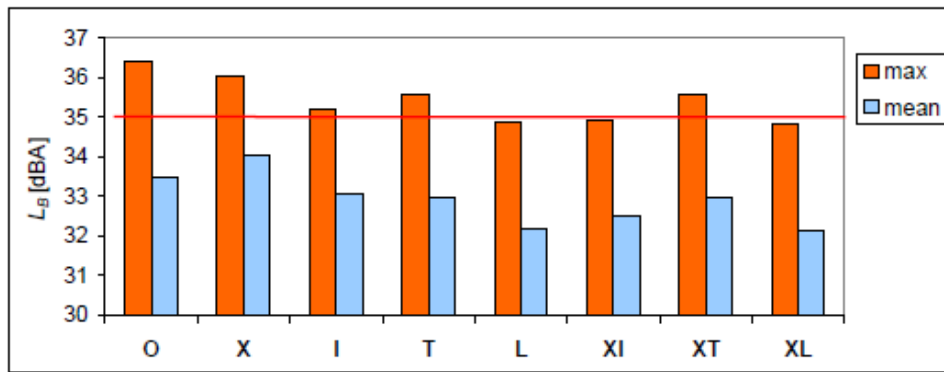


Figura. 3.6. – Valores máximos e médios de ruído de fundo para as oito configurações de material absorvente, nas duas escolas primárias, na Polónia [Adaptado de 57]

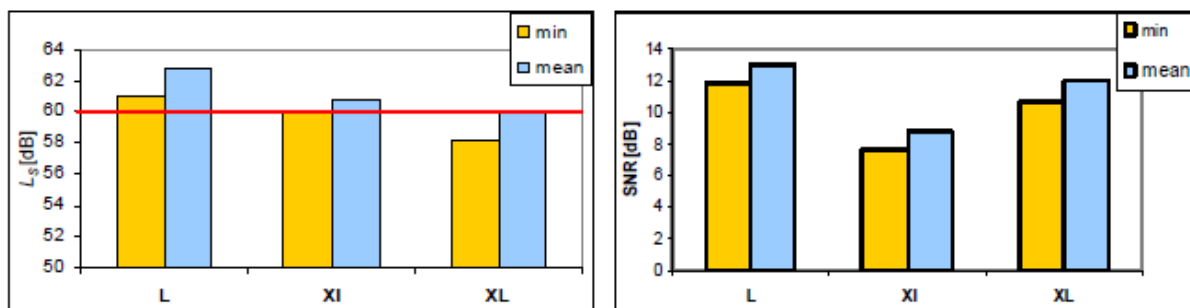


Figura. 3.7. – Comparação dos valores mínimos e médios do nível da voz e relação sinal/ruído para as configurações “L”, “XI” e “XL” nas duas escolas primárias na Polónia [Adaptado de 57]

Durante o ano de 2008, Bradley e Sato [58] realizaram medições acústicas em 41 salas de escolas primárias em Ottawa, com o objetivo de obter uma ideia representativa da qualidade acústica em salas de aulas relacionadas com o controlo do ruído durante as atividades de ensino. Numa primeira fase, os autores procederam à comparação dos valores médios de tempo de reverberação e claridade (C_{50}), para as situações de sala vazia e com ocupação (quadro 3.16). Para os mesmos cenários também foram medidos os valores do ruído de fundo e do nível sonoro da voz. (quadro 3.17).

A partir das medições, os autores concluíram que os resultados obtidos para o tempo de reverberação têm pouca influência no controlo do ruído; a atividade dos estudantes é das principais fontes de ruído dentro da sala de aula, o que leva aos professores a um maior esforço vocal; os valores de ruído de fundo obtidos devem-se aos sons diretos resultantes da atividade de cada estudante, pelo que o seu controlo só pode ser efetuado na fonte do ruído e o ruído provocado pela voz pode ser “melhorado” em cerca de 5 dB através de um aumento da reflexão dentro da sala de aula.

Quadro 3.16. Valores médios de tempo de reverberação e claridade para as 41 salas de aula de escolas primárias em Ottawa [Adaptado de 58]

Tipo de ocupação da sala de aula	Volume médio (m ³)	Tempo de reverberação (s)		Claridade (C50) (dB)	
		Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
C/ ocupação	197	0,41	0,09	10,5	2,68
S/ ocupação		0,45	0,11	9,13	2,63

Quadro 3.17. Valores médios de ruído de fundo e voz dos estudantes em 28 salas de aula de escolas primárias em Ottawa [Adaptado de 58]

Tipo de ocupação da sala de aula	Nível pressão sonora L_{eq} (dB)				Nível sonoro de pressão sonora equivalente L_{Aeq} (dB)			
	Ruído de fundo		Voz dos estudantes / professores		Ruído de fundo		Voz dos estudantes / professores	
	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão
C/ ocupação	44,5	3,7	43,6	2,8	49,1	7,3	59,5	5,5
S/ ocupação	42,1	4,2						

Em 2010, a aluna da FEUP Maria Inês Menezes [59] realizou uma dissertação de mestrado que faz a caracterização da qualidade acústica em escolas secundárias após reabilitação acústica, tendo como caso de estudo a Escola Secundária Rodrigues de Freitas, no Porto. Através de medições *in situ* do ruído de fundo e do tempo de reverberação, que levou ao cálculo do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$), o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachadas ($D_{2m,nT,w}$), o índice de isolamento a ruídos de percussão ($L'_{nT,w}$) e a avaliação do ruído particular de equipamentos ($L_{Ar,nT}$) e as classificações NC e NR do ruído dos equipamentos.

A partir desses resultados, a autora procedeu à comparação dos valores com os limites regulamentares e com as medições antes da reabilitação, verificando uma melhoria significativa em todos os parâmetros acústicos referidos, que levou ao cumprimento de todos os limites presentes no RRAE, para o caso de edifícios escolares. No entanto, os tempos de reverberação obtidos excedem os limites necessários para alcançar uma boa inteligibilidade da palavra e o ruído de fundo, assim como a classificação NC e NR não são respeitados para uma das salas estudadas. O quadro 3.18 apresenta os valores de todos os parâmetros acústicos antes e após a reabilitação.

Quadro 3.18. Comparação dos valores dos vários parâmetros acústicos medidos antes (2008) e após (2010) a reabilitação na Escola Secundária Rodrigues de Freitas, no Porto [Adaptado de 59]

Local		TR médio (s)	D _{nw} (dB)	L' _{nTw} (dB)	D _{2m, n,w} (dB)	L _{Ar,T}	NC	NR	L _{Aeq} (dB) s/ ventilação	L _{Aeq} (dB) c/ ventilação
Sala 1.07	Antes reabilitação (2008)	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	Após Reabilitação (2010)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Sala 1.06	Antes reabilitação (2008)	-	44	78	-	28,2	23	26	32,5	28,9
	Após Reabilitação (2010)	1	49	64	-	-	-	-	-	-
Sala 0.06	Antes reabilitação (2008)	-	37	73	22	37,7	37	37	39,6	29
	Após Reabilitação (2010)	0,9	38	69	23	-	-	-	-	-
Sala 0.07	Antes reabilitação (2008)	-	-	-	-	-	27	27	32,8	25,1
	Após Reabilitação (2010)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

No ano de 2015, Mealings *et al.* [60] compilaram resultados de medições de parâmetros em quatro infantários na Austrália, de diferentes configurações (“fechada”, “dupla”, “tripla – *open plan*” e “K-6 *semi-open*”), com o objetivo de determinar quais as condições ideais para as crianças ouvirem os professores. Através das medições do ruído de fundo, tempo de reverberação, relação sinal/ruído e STI (quadro 3.19), os autores concluíram que as salas de aulas que não conseguem controlar o ruído proveniente de outros espaços não fornecem condições acústicas apropriadas para atividades de audição, uma vez que a percepção da palavra e a capacidade de processar informação, para além do acréscimo de esforço vocal dos professores, que pode levar a problemas de saúde, o que neste estudo são aplicados às salas “tripla e K6 “. Em relação às restantes salas, ambas cumprem com os limites definidos no estudo.

Quadro 3.19. Valores médios de STI, ruído de fundo, e S/R para os quatro tipos de salas de escolas primárias na Austrália [Adaptado de 60]

Parâmetro	Tipo de sala	Atividades								
		S/ ocupação			Atividades silenciosas			Atividades Ruidosas		
		Frente	Meio	Atrás	Frente	Meio	Atrás	Frente	Meio	Atrás
Ruído de fundo (dB(A)) (< 50 dB(A))	Fechada	41,8			43,1			48,8		
	Dupla (fechada)	36,7			46,0			50,3		
	Tripla (open plan)	36,0			57,5			62,1		
	K-6 (semi-open)	46,3			60,5			60,5		
Relação sinal/ruído (dB) (> +15 dB)	Fechada	19,0	18,5	17,4	19,3	18,8	17,7	14,3	13,8	12,7
	Dupla (fechada)	29,1	24,7	22,8	17,5	13,1	11,1	13,3	8,8	6,9
	Tripla (open plan)	27,7	23,8	20,8	5,5	1,7	-1,3	0,8	-3,1	-6,1
	K-6 (semi-open)	13,0	12,8	11,5	-2	-0,3	-1,7	-0,2	-0,3	-1,7
STI (> 0,75)	Fechada	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
	Dupla (fechada)	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,6
	Tripla (open plan)	1,0	0,9	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2	0,4	0,3
	K-6 (semi-open)	0,9	0,8	0,9	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4
Tempo de reverberação médio (s) (< 0,4 -0,5 s)	Fechada	0,5								
	Dupla (fechada)	0,6								
	Tripla (open plan)	0,7								
	K-6 (semi-open)	0,6								

3.2. VALORES IDEAIS DE PROJETO

O quadro 3.20 apresenta um resumo dos vários estudos relacionados com a acústica em infantários e escolas, sendo indicados os parâmetros acústicos medidos pelos vários autores referidos no subcapítulo anterior.

Quadro 3.20. Parâmetros acústicos medidos em salas de aula e infantários por vários autores]

Parâmetros acústicos	TR (s)	Ruído de fundo (dB(A))	Ruído de atividade (dB(A))	Relação Sinal/Ruído (dB)	STI
Fitzroy e Reid [42].	0,5 – 1,7	61 – 72	45 – 70	-	-
Kingsbury e Strumpf [44]	0,4 – 0,52	32 – 34	49 – 82	-	-
Bradley [49]	0,7	38 – 45	-	-	0,80
Airey e Mackenzie [50]	0,7	44,1 – 44,7	-	-	0,5 – 0,7
Polich e Segovia [51]	1,22	49,6	66,5	+1,9	-
Crandell e Smaldino [52]	0,35 – 1,2	41 – 51	48 – 65	-7 a +5	
Bradley e Picard [53].	0,2 – 0,9	-	51,7 – 75	-4,5 a +23	
Knecht et al [54]	0,4 – 1,2	34,4 – 65,9			
Efentakis [55]	0,3 – 2	55	75	-	0,5 – 0,6
Bradley e Sato [58]	0,41 – 0,45	42,2	49,1	+11,1	
Maria Inês Menezes [59]	0,9 – 1	32 – 40	-	-	-
Mealings, Buchholz et al [60]	0,5 – 0,7	36 – 46	68 – 72	-6 a +16	0,3 – 0,88

A partir dos valores obtidos nos vários estudos é possível concluir que tempos de reverberação abaixo dos 0,3 s, afetam a inteligibilidade da palavra, uma vez que provoca o desaparecimento do sinal sonoro quase imediatamente após a sua emissão, tornando difícil a percepção em pontos afastados da fonte sonora. Por outro lado, tempos de reverberação muito altos vão originar sobreposição do mesmo sinal sonoro e um consequente aumento do ruído, levando a falhas de discurso, que crianças entre os 2 e os 5 anos não têm capacidade para completar. Como tal, espaços onde são realizadas atividades em função da inteligibilidade da palavra e que requeiram algum o mínimo de atenção e concentração na execução das mesmas, é ideal um TR entre os 0,4 e 0,6 s.

Em relação ao ruído de fundo, valores muito elevados (a partir de 60 dB(A)), levam a uma quebra no desempenho das crianças na execução de tarefas, reduz a percepção da palavra e pode levar a problemas de saúde devido ao esforço vocal exercido pelos professores. A obtenção do ruído de fundo igual ou inferior a 40 dB(A) permite um aumento da relação sinal/ruído e não interfere com os níveis de intensidade da palavra.

Para finalizar, os valores de RASTI vão melhorar por melhoria do tempo de reverberação e redução do ruído de fundo, sendo que no caso de salas de infantaria seja ideal obter um valor igual ou superior a 0,65, o que corresponde a uma classificação subjetiva de “Boa”. No quadro 3.21 são indicados os valores ideais a obter em projeto.

Quadro 3.21. Valores ideais de projeto definidos pelo autor

Parâmetro	Tempo de reverberação (s)	Ruído de fundo (dB(A))	RASTI
Valor ideal	0,4 – 0,6	≤40	≥0,65

4

LEGISLAÇÃO

4.1. LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL

A Acústica tem sido uma questão com crescente preocupação, levando à criação de corpos legislativos em vários países da União Europeia. De forma a uniformizar conceitos e requisitos, muitas dessas legislações foram motivo de revisão, colocando as questões da exigência, preservação das atividades respeitantes a cada tipo de construção e o conforto acústico como prioridades para toda a sociedade

Em Portugal a atual legislação relacionada com Acústica engloba áreas como Ruído Ambiente, Acústica de Edifícios e Exposição ao Ruído, numa lista que se segue cronologicamente: [61]

Ruído Ambiente:

- DL 146/06 (31/7) – Avaliação e gestão do ruído ambiente, principalmente em infraestruturas de transporte rodoviário, ferroviário, aéreo e aglomerações de maior expressão populacional, transposto para ordem jurídica interna a diretiva nº 2002/49/CE, do Parlamento Europeu;
- DL 221/06 (8/11) – Emissões sonoras relativas a equipamento para utilização no exterior;
- DL 09/07 (17/1) e DL 278/07 (1/8) – Regulamento Geral do Ruído (RGR).

Exposição ao Ruído:

- DL 182/06 (6/9) – Prescrições mínimas de segurança e de saúde referentes à exposição dos trabalhadores ao ruído.

Acústica de Edifícios

- DL 96/08 (9/6) – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

No que diz respeito a “Edifícios escolares e similares, e de investigação”, como o caso da presente dissertação, o RRAE fixa os parâmetros de desempenho a respeitar de forma a garantir o conforto acústico do edifício. O RRAE também define um fator I, referente à incerteza das medições, que são adicionados ao conjunto dos valores medidos, de acordo com cada parâmetro acústico. Segundo o artigo 7º, os requisitos acústicos devem respeitar: [62]

- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m, nT, w}$, entre o exterior dos edifícios, e os compartimentos interiores, como locais recetores, acrescido do fator I no valor de 3 dB, de modo a satisfazer o limite regulamentar, estão indicados no quadro 4.1;
- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT, w}$, entre locais do edifício, acrescido do fator I no valor de 3 dB, de modo a satisfazer o mínimo regulamentar, estão indicados no quadro 4.2;
- O índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT, w}$, proveniente de uma excitação de percussão normalizada sobre pavimentos de outros locais do edifício, como locais emissores, reduzido do fator I no valor de 3 dB, de modo a satisfazer o limite regulamentar, estão indicados no quadro 4.3;
- O nível de avaliação do ruído de equipamentos do edifício, $L_{Ae, nT}$, reduzido do fator I no valor de 3 dB(A), de modo a satisfazer o limite regulamentar, estão indicados no quadro 4.4;
- O tempo de reverberação corresponde à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, reduzido do fator I no valor de 25%, de modo a satisfazer o limite regulamentar, estão indicados no quadro 4.5;

Quadro 4.1. Isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{2m, nT, w}$) entre o exterior dos edifícios [62]

Elementos Construtivos Exteriores	
Zonas sensíveis	$D_{2m, nT, w} \geq 28 \text{ dB}^*$
Zonas mistas (ou sensíveis com grande infraestrutura de transporte)	$D_{2m, nT, w} \geq 33 \text{ dB}^*$

*Se a área translúcida > 60% da fachada adiciona-se C ou C_{tr} ao valor medido, conforme o tipo de ruído, definido na NP EN ISO 717-1 [54]

Quadro 4.2. Isolamento sonoro mínimo a sons de condução aérea ($D_{nT, w}$) entre locais do edifício [62]

Locais de receção - Locais de emissão	$D_{nT, w} \text{ (dB)}$		
	Sala de aula, de professores, música e administrativos	Bibliotecas, gabinetes médicos	Salas Polivalentes, berçários
Sala de aula, de professores, administrativo	45	45	45
Sala de aula musical, salas polivalentes, refeitórios, ginásios e oficinas	55	58	50
Berçários	53	55	48
Corredores de grande circulação	30	35	30

Quadro 4.3. Isolamento sonoro máximo a sons de percussão ($L'_{nT, w}$) [62]

Locais	$L'_{nT, w} \text{ (dB)}$
Salas de aulas, berçário ou salas polivalentes	65 dB
Corredor de grande circulação, ginásio, refeitório ou oficina	60 dB

Quadro 4.4. Nível de avaliação a ruídos de equipamentos ($L'_{Ar, nT}$) [62]

Locais	$L'_{Ar, nT} \text{ (dB)}$
Bibliotecas	35 dB (funcionamento contínuo)
	30 dB (funcionamento intermitente)
Salas de aula, de professores, polivalentes, refeitórios, ginásios, berçários, administrativos	35 dB (funcionamento contínuo)
	40 dB (funcionamento intermitente)

Quadro 4.5. Tempo de reverberação máximo nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares [62]

Locais	Tempo de Reverberação (s)	
	Sem sistema difusão de mensagens sonoras	Com sistema difusão de mensagens sonoras
Salas de aulas, bibliotecas, salas polivalentes, refeitórios	$0,15 V^{1/3}$	
Ginásios	$0,15 V^{1/3}$	$0,12 V^{1/3}$

4.2. LEGISLAÇÃO EM OUTROS PAÍSES

4.2.1. REINO UNIDO

No Reino Unido foi publicado em 1 de janeiro de 2003 o *Building Bulletin 93 - Acoustic designs of schools (BB93)* [63], documento que veio a substituir as recomendações relacionadas com a acústica dos espaços escolares e complementar a regulamentação referentes à térmica, iluminação, ventilação, climatização e abastecimento de água, presentes no *Building Bulletin 87*.

O BB93 tem como principais objetivos o estabelecimento de padrões mínimos de desempenho acústico em edifícios escolares, em conformidade com a restante regulamentação em Construções e providenciar linhas orientadoras a todos os intervenientes (arquitetos, engenheiros, técnicos e clientes) no planeamento e construção de espaços acusticamente adequados para o ensino.

Este documento divide-se em sete capítulos, sendo nos capítulos 1 a 6 são indicados as definições e recomendações relativos a parâmetros acústicos tais como tempo de reverberação, isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e de percussão ($D_{nT,w}$ e $L_{nT,w}$), STI e ruído de fundo (L_{Aeq}) (quadros 4.6 – 4,9); apresentação sistemas de isolamento sonoro e de soluções construtivas e equipamentos necessários, específicas para salas destinadas à palavra, ensino musical ou para alunos com dificuldades de audição. O último capítulo faz referência a casos de estudo que ilustram alguns dos aspetos mais importantes a ter em conta na conceção de casos semelhantes, englobando exemplos como salas de aula em escolas primárias e secundárias, salas para música ou salas para alunos com dificuldades auditivas.

Quadro 4.6. Isolamento sonoro mínimo a sons de condução aérea ($D_{nT,w}$) em edifícios escolares segundo o BB93 [63]

$D_{nT,w}$ (dB)		Ruído na sala emissora			
		Baixo	Médio	Elevado	Muito Elevado
Tolerância ao ruído na sala recetora	Alta	30	35	45	55
	Média	35	40	50	55
	Baixa	40	45	55	55
	Muito Baixa	45	50	55	60

Quadro 4.7. Nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) em edifícios escolares, segundo o BB93 [63]

Tipo de Sala	Ruído na sala emissora	Tolerância ao ruído na sala recetora	L_{Aeq} (dB)
Sala de infantário	Elevado	Baixa	35
Sala de aula em escolas primárias / secundárias	Médio	Baixa	35
Salas de aula em <i>open plan</i>	Médio	Média	40
Sala de música	Muito elevado	Baixa	35
Auditório (< 50 pessoas)	Médio	Baixa	35
Auditório (≥ 50 pessoas)	Médio	Muito baixa	30
Salas de aula destinadas a alunos com dificuldades auditivas	Médio	Muito baixa	30
Sala de estudo	Baixa	Baixa	35
Biblioteca – zona de estudo	Baixo	Baixa	35
Biblioteca – zona de pesquisa	Médio	Média	40
Laboratórios	Médio	Média	40
Sala de teatro	Elevado	Muito baixa	30
Oficinas	Elevado	Alta	40
Salas de Desenho	Médio	Média	35
Salas polivalentes	Elevado	Baixa	35
Salas de audiovisual e videoconferência	Médio	Baixa	35
Átrios e zonas de circulação comuns	Médio	Média	45
Sala de dança / ginásio	Elevado	Média	40
Piscina	Elevado	Alta	50
Posto médico	Baixo	Baixa	35
Cantina	Elevado	Alta	45

Cozinha	Elevado	Alta	50
Salas administrativas	Médio	Média	40
Balneários	Elevado	Alta	45
Casas de Banho	Médio	Alta	50

Quadro 4.8. Índice de isolamento sonoro máximo a ruídos de percussão ($L'_{nT w}$) segundo o BB93 [63]

Tipo de sala	$L'_{nT w}$ (dB)
Sala de infantário	66
Sala de aula em escolas primárias / secundárias	60
Salas de aula em <i>open plan</i>	60
Sala de música	55
Auditório (< 50 pessoas)	60
Auditório (\geq 50 pessoas)	55
Salas de aula destinadas a alunos com dificuldades auditivas	55
Biblioteca / Sala de estudo	60
Laboratórios	65
Sala de teatro	55
Oficinas	65
Salas de Desenho ou polivalente	60
Salas de audiovisual e videoconferência	60
Átrios e zonas de circulação comuns	65
Sala de dança	60
Ginásio / piscina	65

Posto médico	60
Cozinha / Cantina	65
Salas administrativas	65
Balneários / Casa de banho	65

Quadro 4.9. Tempo de reverberação máximo na média das frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o BB93 [63]

Tipo de sala	Tempo de Reverberação (s)
Sala de infantário / escolas primárias	0,6
Salas de aula em escolas secundárias	0,8
Salas de aula em <i>open plan</i>	0,8
Sala de música	1,0
Auditório (< 50 pessoas)	0,8
Auditório (≥ 50 pessoas)	1,0
Salas de aula destinadas a alunos com dificuldades auditivas	0,4
Sala de estudo	0,8
Bibliotecas	1,0
Laboratórios	0,8
Sala de teatro	1,0
Sala de desenho / oficinas	0,8
Salas polivalentes	0,8 – 1,2
Salas de audiovisual e videoconferência	0,8
Átrios e zonas de circulação comuns	1,5
Sala de dança	1,2

Ginásio	1,5
Piscina	2,0
Posto médico	0,8
Cantina	1,0
Cozinha	1,5
Salas Administrativas	1,0
Balneários / casa de banho	1,5

4.2.2. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

Durante a década de 1990, os EUA tinham em andamento um plano de requalificação e construção do espaço escolar em todo o país. Apesar do orçamento de 7,9 biliões de dólares ser suficiente para a renovação de todos os recintos escolares, a inexistência de qualquer documentação de apoio e a falta de sensibilidade para as questões da qualidade acústica em escolas foram problemas para arquitetos, engenheiros e profissionais envolvidas. Com vista a alertar sobre a problemática da qualidade acústica e providenciar orientação no planeamento e conceção de recintos escolares, foi publicado em 2000, o *Classroom Acoustics*. [64]

Em 2002, a *Acoustical Society of America*, juntamente com a *U.S Access Board* e *The American National Standards Institute* (ANSI) publicaram a norma ANSI S12-60 [65]. Nesta norma são apresentados requisitos de desempenho acústico e fornece informação relacionada com boas práticas de conceção e construção de edifícios escolares nos EUA, sendo constituída por dois volumes; o primeiro volume, publicado em 2010, diz respeito a espaços importantes para o ensino, tais como sala de aulas ou edifícios auxiliares; o segundo volume, atualizado em 2009, é aplicável a salas de aula ou a espaços auxiliares amovíveis.

Nesta norma estão fixados os valores máximos de ruído de fundo, num período de uma hora, e do tempo de reverberação, medido nas bandas de 500, 1000 e 2000 Hz, em função do volume, do tipo de espaço e das condições de funcionamento de equipamentos (AVAC), apresentados nos quadros 4.10 e 4.11, enquanto o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$), os valores mínimos são caracterizados através do parâmetro STC – *Sound Transmission Class*, nos quadros 4.12 e 4.13.

Quadro 4.10. Valores máximos de ruído de fundo e tempo de reverberação segundo a ANSI S12.60 [65]

Volume do espaço (m ³)	Ruído de fundo ($L_{Aeq,60min}$) (dB)	Tempo de reverberação máximo (s)
$V \leq 283 \text{ m}^3$	35	0,6
$283 \leq V \leq 566 \text{ m}^3$	35	0,7
$V > 566 \text{ m}^3$	40	Sem exigências

Quadro 4.11. Valores máximos de ruído de fundo de tempo provocado pelos equipamentos AVAC segundo a ANSI S12.60 [65]

Espaços de aprendizagem	Condições de funcionamento do sistema AVAC	Ruído de fundo ($L_{Aeq,60min}$) (dB)	
		Equipamentos simples de AVAC	Equipamentos múltiplos de AVAC
Principais	Máxima capacidade	35	37
	Mínima capacidade	Não aplicável	34
Auxiliares	Máxima capacidade	40	42
	Mínima capacidade	Não aplicável	39

Quadro 4.12. Valores mínimos de STC (dB) entre salas de aula e diferentes espaços adjacentes segundo a ANSI S12.60 [65]

Espaços adjacentes			
Salas de aula, posto médico	Uso comum e público, casas de banho ou balneários	Corredores, escadas, gabinetes ou auditórios	Sala de música, sala de máquinas, bar, refeitórios e ginásios
50	53	45	60

Quadro 4.13. Valores mínimos de STC (dB) entre espaços de ensino auxiliares e diferentes espaços adjacentes segundo a ANSI S12.60 [65]

Espaços adjacentes ao local de aprendizagem	Corredor, Caixa de escadas, casa de banho	Sala de música	Gabinete, sala de conferências	Equipamento mecânico, ginásios, bares, refeitórios e piscinas
Corredor	45	60	45	55
Sala de música	60	60	60	60
Gabinete ou sala de conferências	45	60	45	60

4.2.3. FRANÇA

Em França está em vigor o decreto de 25 de Abril de 2003 [66], que define os requisitos acústicos para edifícios educacionais, sendo a legislação francesa exigente também no que diz respeito a infantários. Os valores máximos de isolamento sonoro a ruídos de percussão, $L'_{nT,w}$, em função do tipo de ocupação do compartimento emissor, são medidos e calculados tal como na legislação Portuguesa e os limites são dados pelo quadro 4.14, sendo que no caso de infantários o valor não deve ser superior a 60 dB. No que toca ao interior da escola, o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, $D_{nT,w}$, tem de ser igual ou superior aos valores indicados no quadro 4.15. A legislação Francesa também apresenta valores

máximos para o tempo de reverberação, em função do tipo de ocupação e volume, que estão indicados no quadro 4.16.

Quadro 4.14. França – Valores máximos de $L'_{nT,w}$ segundo o decreto de Abril de 2003 [66]

Tipo de ocupação do compartimento emissor	Valor máximo de $L'_{nT,w}$ (dB) na sala de aula recetora
Pavilhão desportivo	45
Sala de exercícios (jardim-de-infância)	55
Qualquer outro espaço da escola	60

Quadro 4.15. França – Valores mínimos de DnT,w (dB) segundo o decreto de Abril de 2003 [66]

Locais de receção - Locais de emissão	Salas de repouso	Sala de exercícios / salas de aula	Salas Administrativas	Posto Médico	Salas de reuniões, gabinetes, cozinha, refeitório, átrio, polivalentes	Zonas de circulação, Balneários
Salas de repouso	43	50	50	50	55	35
Salas de aula, salas de exercícios	50	43	43	50	53	30
Sala de professores, administrativos	43	43	43	50	53	30
Posto Médico	50	50	43	43	53	40

Quadro 4.16. Tempo de reverberação máximo, na média das frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o decreto de Abril de 2003 [66]

Local	Tempo de reverberação médio (s)
Salas de aprendizagem, refeitórios, salas polivalentes, salas de música com Volume $\leq 250 \text{ m}^3$; Salas de repouso, salas de exercícios, salas de atividades em jardins-de-infância; Posto médico, salas administrativas, casas de banho, biblioteca.	$0,4 \leq Tr \leq 0,8 \text{ s}$
Salas de aprendizagem, de música, de estudo ou atividades práticas com volume $> 250 \text{ m}^3$	$0,6 \leq Tr \leq 1,2 \text{ s}$
Refeitório com volume $> 250 \text{ m}^3$	$Tr \leq 1,2 \text{ s}$
Sala polivalente com volume $> 250 \text{ m}^3$	$0,6 \leq Tr \leq 1,2 \text{ s}$
Outros locais e zonas de circulação com volume $> 250 \text{ m}^3$	$Tr \leq 1,2 \text{ s}$ se $250 \text{ m}^3 \leq V \leq 512 \text{ m}^3$ $Tr \leq 0,15\sqrt[3]{V} \text{ s}$ se $V > 512 \text{ m}^3$

Pavilhão desportivo	Remete para outro artigo regulamentar da legislação francesa relativa a edifícios habitacionais
---------------------	---

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAÍSES

O quadro 4.17 apresenta o resumo dos vários limites regulamentares a cumprir para salas de aula, para cada um dos países referidos no subcapítulo anterior, onde são analisados o tempo de reverberação máximo, isolamento sonoro mínimo a ruídos de condução aérea entre locais do edifício e de percussão e o nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo.

Quadro 4.17. Comparação dos valores regulamentares entre Portugal, Reino Unido, EUA e França

Parâmetro	Portugal [62]	Reino Unido [63]	EUA [65]	França [66]
Isolamento sonoro mínimo a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$) entre locais do Edifício (dB)	45	45	50 ^{c)}	43 ^{a)} 30 ^{b)}
Isolamento sonoro máximos ruídos de percussão ($L'_{nT,w}$) (dB)	65	66	45	55
Tempo de reverberação máximo (s)	$0,15 \times V^{1/3}$	0,8	0,7 ^{d)}	$0,6 \leq TR \leq 1,2$
Nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) (dB)	27 ^{e)} 32 ^{f)}	35	35	Não especificado

a) Entre salas de aula; b) Entre sala de aula e zona de circulação; c) STC; d) Para a situação de $283 \leq V \leq 566 \text{ m}^3$ e) Zona sensível; f) Zona Mista

Por análise do quadro é possível confirmar que o isolamento sonoro a ruídos de condução área apresentam valores muito semelhantes entre os regulamentos dos países europeus. Em relação ao regulamento americano, o valor de $D_{nT,w}$ (ou STC) é obtido pelas medições do nível de pressão sonora, por bandas de 1/3 de oitava, e da absorção sonora em laboratório, o que leva a um valor superior. Relativamente ao isolamento a ruídos de percussão, os regulamentos português e britânico são os mais exigentes, uma vez que apresentam os valores superiores que nos casos francês e americano, sendo este último regulamento também obtido através de ensaios laboratoriais.

No que toca ao tempo de reverberação, é de salientar que o valor do regulamento britânico é obtido independentemente do volume do espaço, ao contrário dos restantes países. No entanto, quando se comparam os valores entre EUA, França e Portugal, verificam-se valores distintos. Ao considerar o volume do caso de estudo (295 m^3), o valor obtido no RRAE é aproximadamente de 1 s, superior aos 0,7 s obtidos na ANSI 12.60 e no regulamento francês e dos 0,8 s do regulamento britânico.

No caso do ruído de fundo, o regulamento francês não preconiza nenhum valor limite, o que significa que é o menos exigente, ao contrário dos regulamentos americano, que é obtido em função do volume, do regulamento britânico, que vem em função do tipo de espaço e do caso português, que surge em função do tipo de zona (sensível ou mista).

Por fim, é possível concluir que o RRAE é dos regulamentos, aquele que apresenta menor exigência, principalmente ao nível do tempo de reverberação, onde fórmula de cálculo não tem em conta o tipo de espaço e o aumento de volume conduz valores muito elevados.

5

INFANTÁRIO E JARDIM DE INFÂNCIA CAROLINA MICHAËLIS

5.1. INTRODUÇÃO

A Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis (AIJICM) (figuras 5.1 e 5.2) é uma associação que recebe crianças com idades dos 4 meses aos 5 anos, funcionando como uma Instituição Particular de Solidariedade Social (IPSS) para crianças a partir dos 3 anos, situada na Rua Infanta Dona Maria, freguesia de Cedofeita, junto à Escola Secundária Carolina, no Porto.

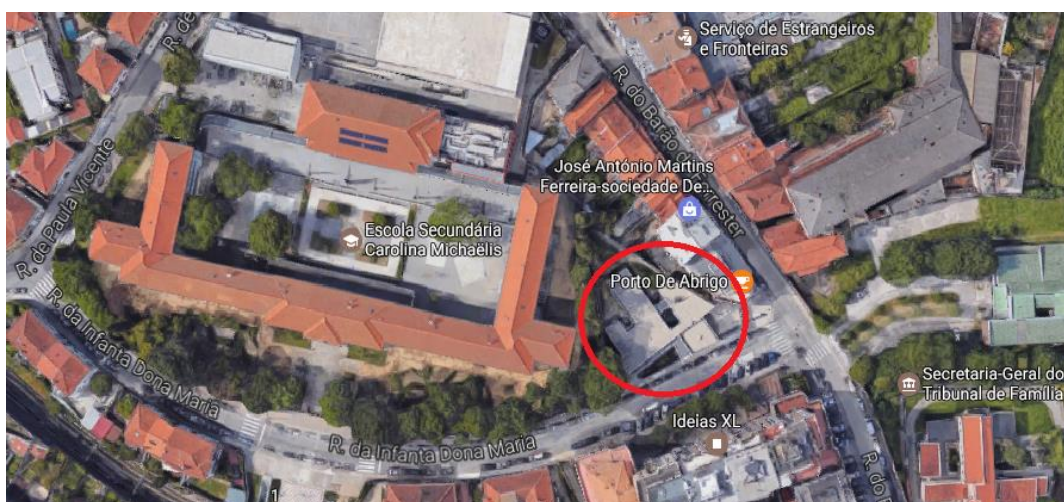


Figura. 5.1. – Vista aérea da Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis [67]



Figura. 5.2. – Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis [Fotografia do autor]

Esta instituição teve início em setembro de 1983, dando continuidade ao trabalho desenvolvido desde 1973 no apoio e assistência a crianças do ensino pré-escolar, em instalações cedidas pela Escola Secundária Carolina Michaëlis e com ajuda financeira do Ministério da Educação. Constituída por uma componente de creche e de educação pré-escolar, Associação tem objetivos *“focados no estabelecimento de condições de segurança, saúde, afeto e bem-estar a cada criança, assim como inculcar valores como tolerância, respeito pela pluralidade de culturas e consciência enquanto cidadão, desenvolvimento de competências ao nível da comunicação, expressão e processos que favoreçam um espírito crítico e a curiosidade e auxiliar na identificação de inaptações e atrasos no progresso da criança.”* [68]

Atualmente, a AIJCM é uma instituição aberta para toda a comunidade, independentemente do estatuto social das famílias, e é gerido em regime de voluntariado pelos encarregados de educação e através de acordos celebrados com o Ministério da Educação e com o Centro Distrital de Segurança Social do Porto [68]

5.2. CARACTERIZAÇÃO

A instituição é composta por um edifício único, composto por dois pisos e por um corpo que reúne acessos, circulações e a zona administrativa, que ocupa a frente para a rua. No que toca ao corpo principal, estão ligados outros espaços, projetados para o interior do lote que correspondem às zonas destinadas aos diversos grupos etários, constituídos pelas salas de atividades e pelos pátios, que servem de ampliação natural, para o exterior das salas de atividades, de forma a proporcionar uma maior qualidade ao nível da iluminação, conforto visual e ventilação. A fachada principal encontra-se protegida por um gradeamento exterior e portão em ferro pintado, de forma a permitir o controlo de entradas e saídas das pessoas, e as paredes são constituídas por um sistema de isolamento térmico pelo exterior, solução aplicada em todo o edifício [69]

O piso -1 (figura 5.3) é formado pela cozinha, vestiários de apoio, zonas de armazenagem e uma entrada de serviço abastecimento do edifício. É a partir da cozinha que é estabelecido o funcionamento da zona de refeições, localizado no piso 0, através da localização de zonas específicas de lavagem de alimentos, confeção e recolha de louça. O transporte das refeições é feito por um sistema vertical de monta-pratos, onde é feita a distinção entre a loiça limpa e suja.

O piso 0 (figura 5.4) é composto por três grandes zonas:

- Refeitório e sala polivalente – Área dividida entre a realização de atividades extracurriculares tais como dança, ioga, teatro ou música e a hora das refeições, onde as crianças são distribuídas por faixa etária; Espaço amplo, sem nenhuma separação física que distinga o tipo de atividades desenvolvidas e com pouco mobiliário de suporte;
- Jardim de infância – Espaço destinado a crianças entre os 3 e 5 anos, formado por duas salas amplas, organizadas por temáticas abordadas ao longo do ano letivo, devidamente identificadas e acessíveis a cada criança, tendo ligação ao exterior;
- Creche – Constituído por sala de berçário e salas de 1 e 2 anos, com ligação ao exterior, organizados a partir da mobilidade das crianças nas suas fases de desenvolvimento, que a partir da decoração de cada sala e dos materiais fornecidos pelos educadores, as crianças aprendam noções ao nível do espaço circundante, mobilidade e relações entre matéria e materiais.

As características de cada espaço, estão apresentadas no quadro 5.1. Os comprimentos, áreas e volume de cada compartimento foram obtidos com recurso à memória descritiva do projeto de arquitetura e através do ficheiro em *AutoCAD*.

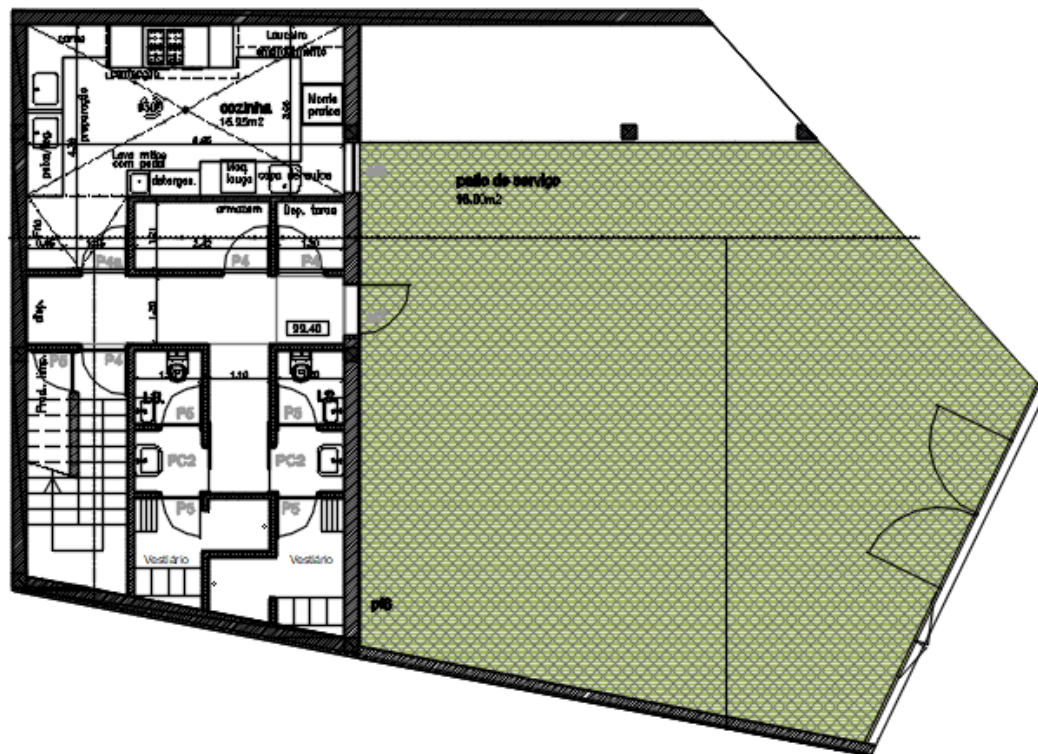


Figura. 5.3. – Planta do piso -1, (sem escala) [69]

Quadro 5.1. Características arquitetônicas do piso -1 do caso de estudo [69]

Compartimento	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m²)	Volume (m³)
Cozinha	5,65	4,38	19,62	59
Instalações Sanitárias e Vestiários	1,20	5,40	6,50	19,5
Instalações Sanitárias e Vestiários	1,20	6,00	7,20	21,6
Armazém	2,42	1,24	2,90	8,7
Depósito de taras	1,20	1,21	1,45	4,4
Circulação	-	-	9,66	29

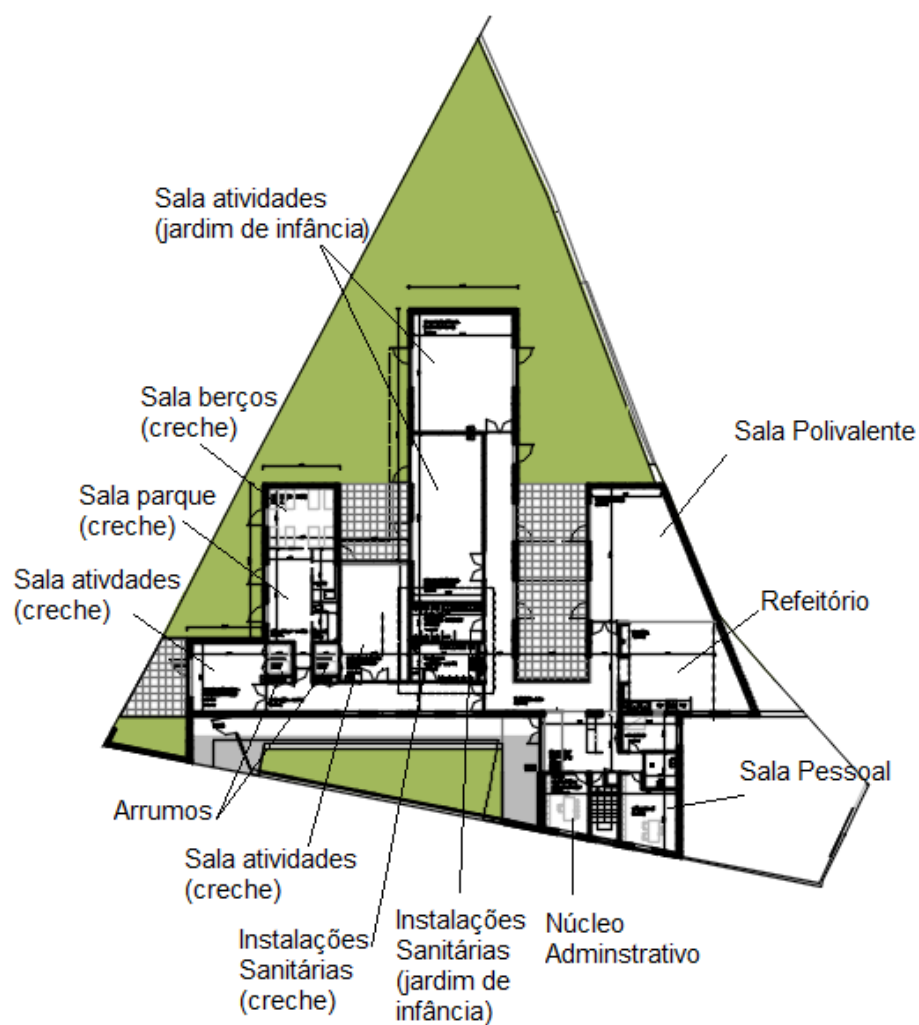


Figura. 5.4. – Planta do piso 0 (sem escala) [69]

Quadro 5.2. Características arquitetónicas do piso 0 do caso de estudo [69]

Compartimento	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Receção	5,05	3,60	20,00	60,0
Núcleo administrativo	3,60	2,93	10,50	31,5
Escada	3,80	1,80	6,80	43,5
Sala de pessoa	3,73	3,95	14,10	42,3
Instalação Sanitária	2,19	2,20	4,82	14,5
Refeitório	6,26 – 8,5	5,75	43,50	130,5

Sala polivalente	4,56 – 8,00	8,61	54,70	164,1
Instalação sanitária (jardim de infância)	4,81	2,46	11,80	35,4
Sala de atividades (jardim de infância)	10,80	4,63	50,00	150,0
	7,65	6,55	50,00	150,0
Circulação (creche)	14,44	1,80	26,00	78,0
Instalação sanitária (creche)	4,36	2,46	10,80	32,4
Sala de atividades (24 a 36 meses) – creche	7,73	4,50	34,70	104,1
Arrumos	1,75	2,00	3,60	9,6
Sala parque (creche)	5,95	2,63	19,30	58
Copa de leites	2,52	1,70	4,50	13,5
Higiene	3,38	1,70	5,90	17,7
Sala de berços (creche)	4,40	17,10	17,10	51,3
Sala de atividades (marcha a 24 meses) - creche	4,88	4,40	21,50	64,5

5.3. MEDIÇÕES ACÚSTICAS

5.3.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS E EQUIPAMENTO UTILIZADO

Tendo em vista a caracterização acústica do Infantário Carolina Michaëlis, foram realizadas medições na sala polivalente e refeitório (figura 5.5) no dia 5 de abril de 2017, entre as 15:00 e as 18:30 h. Com recurso a equipamentos do Laboratório de Acústica da FEUP e apoio do Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, procedeu-se à medição dos seguintes parâmetros acústicos:

- Tempo de reverberação;
- Nível de pressão sonora do ruído de fundo;
- RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

Para a medição dos diferentes parâmetros acústicos, foram utilizados os seguintes equipamentos, disponibilizados pelo Laboratório de Acústica da FEUP:

- Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 (figura 5.6);
- Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 (figura 5.7);
- Equipamento de RASTI Brüel & Kjær (figuras 5.8 e 5.9)
 - Emissor, modelo 4225;
 - Recetor, modelo 4419;
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189;
- Tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049.



Figura. 5.5. Sala polivalente e refeitório [Fotografia do autor]



Figura. 5.6. – Emissor Brüel & Kjær, modelo 4224
[Fotografia do autor]



Figura. 5.7. – Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260
[Fotografia do autor]



Figura. 5.8. – Equipamento RASTI: Emissor Brüel & Kjær, modelo 4225 [Fotografia do autor]



Figura. 5.9. – Recetor Brüel & Kjær, modelo 4419 [Fotografia do autor]

5.3.2. METODOLOGIA

5.3.2.1. Tempo de reverberação

A medição do tempo de reverberação foi efetuada com recurso ao sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 e uma fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224, segundo as indicações da norma NP EN ISO 3382 [70], onde os aparelhos se encontram ligados entre si, de forma a evitar a influência do ruído de fundo existente.

A fonte sonora foi colocada numa posição onde os educadores ocuparão a maior parte do tempo, onde emitiu um ruído branco durante 10 segundos, estando apenas presentes no espaço o operador do sonómetro e o autor do trabalho. Após a emissão, o sonómetro regista o tempo de decaimento de 20 e 30 dB, em bandas de frequência de 1/1 oitava compreendida entre os 63 e os 8000 Hz, apesar que no presente trabalho serão apresentados os valores correspondentes às bandas dos 125 aos 4000 Hz, que representam as frequências mais significativas para a tipo de utilização do espaço.

Para a obtenção dos valores deste parâmetro, foram realizadas três medições em pontos distintos, sendo registados dois valores em cada um dos pontos, aproximadamente a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento total da sala, com a fonte sonora colocada ao nível do pavimento e com o sonómetro aproximadamente a 1,30 m do piso, como indicam as figuras 5.10 e 5.11.

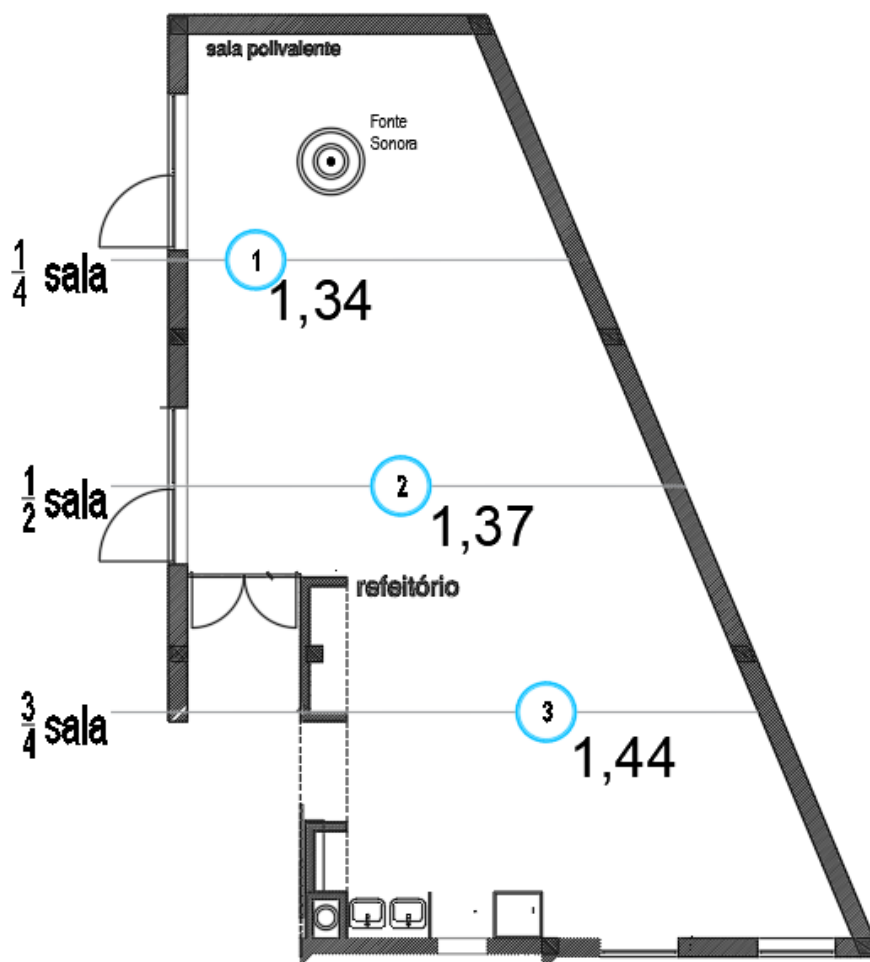


Figura. 5.10. – Tempo de reverberação: localização dos pontos de medição e da fonte sonora na sala polivalente no infantário



Figura. 5.11. – Medição do tempo de reverberação no infantário [Fotografia do autor]

5.3.2.2. Ruído de atividade

As medições do ruído de atividade foram realizadas com auxílio do sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 e do tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049.

Para a avaliação deste parâmetro, efetuaram-se medições dentro do espaço em estudo, onde foram englobados diferentes cenários de utilização e no exterior da sala, durante as atividades de recreio, de forma a analisar a influência do ruído provocado no caso em estudo. Os cenários avaliados foram os seguintes:

- C1 - Hora do lanche para as crianças entre os 1 – 2 anos, englobando as atividades de organização e entrada das crianças no refeitório, o lanche e a saída do local, num total de 28 crianças e 3 educadores envolvidas, com duração total de 20 minutos (figura 5.12);
- C2 - Hora do lanche para as crianças entre os 3 – 4 anos, englobando as atividades do lanche e a saída do refeitório, no máximo de 35 crianças e 3 educadores, com duração total de 20 minutos (figura 5.13);
- C3 - Ruído de fundo com a sala polivalente e refeitório vazios, apenas com o operador do sonómetro e do autor deste trabalho, com duração igual a 10 minutos (figura 5.14).

Em cada uma das situações, foram medidos os valores para as bandas de frequência 1/1 oitava, dos 16 Hz aos 16 kHz, do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e também com a aplicação do filtro A, (L_{Aeq}).



Figura. 5.12. – Medição do ruído de atividade na turma de 1 – 2 anos [Fotografia do autor]



Figura. 5.13. – Medição do ruído de atividade na turma de 3 – 4 anos [Fotografia do autor]



Figura. 5.14. – Medição do ruído de fundo na sala polivalente sem ocupação [Fotografia do autor]

5.3.2.3. RASTI

Para a avaliação do RASTI foram utilizados os equipamentos Brüel & Kjær, que consistem no emissor, modelo 4225, e no recetor, modelo 4419.

Neste ensaio, o emissor está localizado no eixo longitudinal da sala, colocado num tripé, a cerca de 1,30 m de altura, posicionado junto ao local onde normalmente se encontra o educador, que emite um sinal sonoro característico nas bandas de frequências de oitava de 500 e 2000 Hz. Durante a ocorrência dos trabalhos só estiveram presentes o operador do equipamento e o autor deste trabalho.

Em relação ao recetor, operado pelo Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, funciona como uma unidade móvel que faz a leitura dos valores em seis pontos distintos (figuras 5.15 e 5.16), distribuídos por três zonas, correspondentes a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento total sala, através da medição de três valores por cada ponto, obtendo um total de 18 leituras, sendo o valor final obtido por média aritmética.



Figura. 5.15. – Medição do RASTI na sala polivalente no infantário [Fotografia do autor]

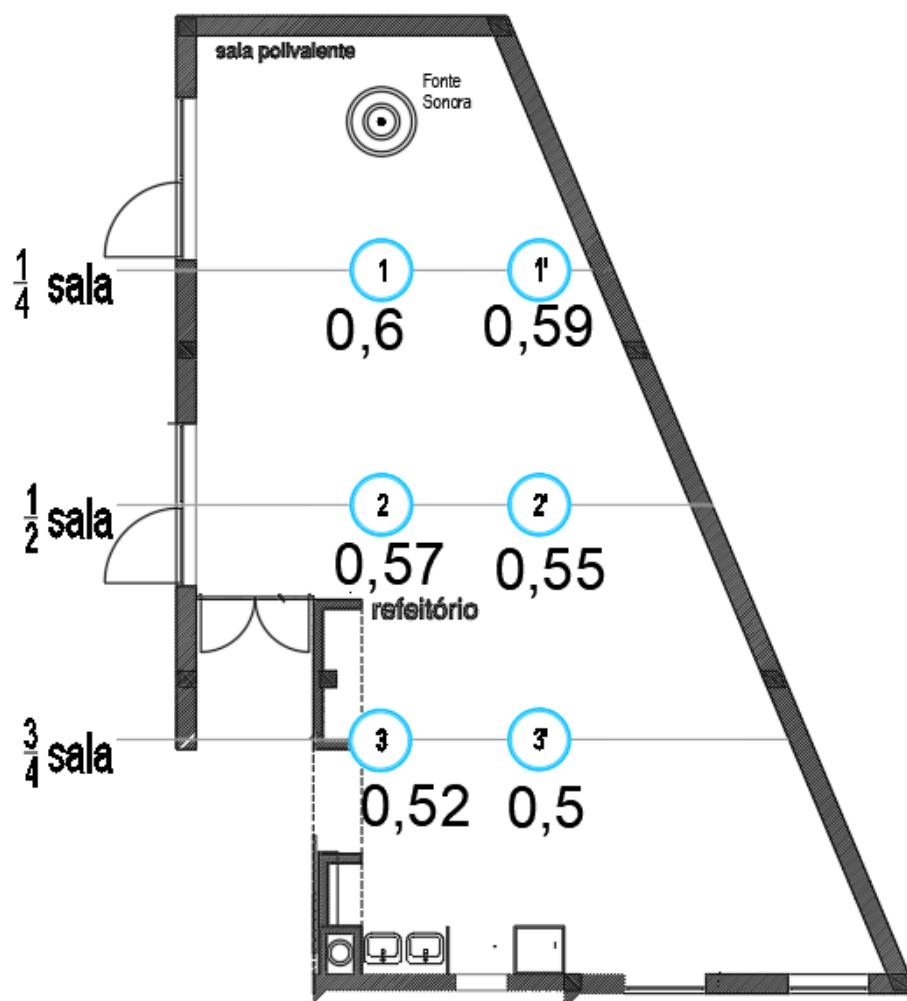


Figura. 5.16. – Medição do RASTI – Localização dos pontos de medição e da fonte sonora no infantário

5.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Os valores de tempo de reverberação da sala polivalente e refeitório do infantário encontram-se no quadro 5.3, medidos relativamente aos pontos anteriormente referidos e por banda de frequência entre os 125 e 4k Hz.

Quadro 5.3. Valores do tempo de reverberação medidos para a sala polivalente e refeitório

Ponto de medição	Banda de frequência (Hz)						TR _{médio} [500, 1k, 2k] (s)
	125	250	500	1k	2k	4k	
1	1,13	1,03	1,25	1,41	1,36	1,19	1,34
2	1,37	1,07	1,33	1,41	1,36	1,18	1,37
3	1,12	1,14	1,37	1,54	1,42	1,16	1,44
TR _{médio} (s)	1,21	1,08	1,32	1,45	1,38	1,18	1,38

O tempo de reverberação está relacionado com as condições geométricas e as características de absorção sonora do espaço, o que traz efeitos ao nível da inteligibilidade da palavra. A partir das medições é possível verificar que o tempo de reverberação apresenta acima do regulamentar, justificados através das características do espaço em estudo, caracterizada por uma grande volumetria e pouco mobiliário de apoio.

Outro aspeto possível observar através dos resultados do ensaio é variação do TR ao longo das bandas de frequência, verificando um aumento do tempo entre os 125 e 1000 Hz e um decréscimo entre os 2000 e 4000 Hz, (figura 5.17). Tal comportamento pode ser explicado através da atenuação do ar em altas frequências, que no caso em estudo, tem grande influência em espaços com grande volume e nas baixas frequências pela absorção dos materiais de apoio, tais como mesas, estantes em madeira ou a cortina em veludo e PVC, presentes na área destinado ao refeitório.

Para um melhor entendimento dos resultados do ensaio, o quadro 5.4 faz a comparação entre os valores de tempo de reverberação relativamente à legislação de cada país e ao valor proposto pelo autor para esse mesmo parâmetro. Em Portugal, o cálculo do TR, segundo o RRAE, considera apenas os valores relativos às bandas de frequência dos 500 aos 1000 Hz. Para o caso em estudo, com volume de 295 m³, o TR obtido é aproximadamente 1,25 segundos.

Com base no resultado dos ensaios, é possível verificar que o tempo de reverberação medido é possível verificar que o tempo de reverberação não cumpre nenhum dos requisitos regulamentares dos países referidos. Relativamente ao valor ideal de 0,50 s, sugerido pelo autor, facilmente se percebe que o caso de estudo também fica muito aquém do máximo proposto.

Outra forma de analisar quão elevado é o valor medido do tempo de reverberação, o quadro 5.5 apresenta a comparação com outros casos de estudo investigados ao longo dos anos. Como se pode verificar pelos valores indicados, o tempo de reverberação obtido no ensaio é muito superior em relação a qualquer

outro exemplo descrito. Tendo em conta que o atual caso de estudo é uma construção recente é de salientar a diferença de condições obtidas em termos acústicos, especialmente por se tratar de um espaço onde são realizadas atividades vocacionadas para a palavra, o que leva a uma maior dificuldade no entendimento por parte das crianças, que não possuem capacidade cognitiva para preencher as falhas ao nível do discurso.

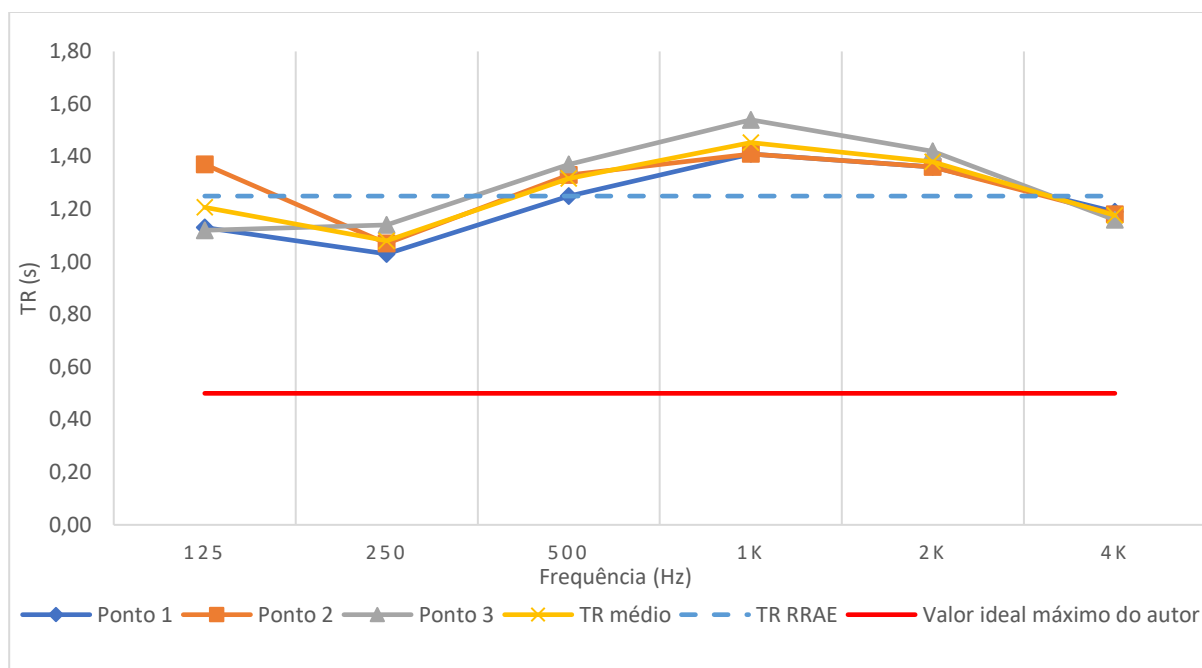


Figura. 5.17. – Tempo de reverberação por banda de frequência dos 125 Hz aos 4000 Hz medidos nos três pontos de medição na sala polivalente e refeitório

Quadro 5.4. Comparação entre tempo de reverberação medido e os máximos regulamentares para espaços escolares e valor ideal definido pelo autor

TR _{médio} medido (s)	Portugal (RRAE) (s) [62]	Reino Unido (BB93) (s) [63]	EUA (ANSI S12-60) (s) [65]	França (s) [66]	Valor ideal do autor (s)
1,38	1,25	0,60	0,70	0,7	0,50

Quadro 5.5. Comparação entre tempo de reverberação medido e os valores medidos por outros autores noutras situações

TR _{médio} medido (s) (2017)	Bradley Sato [58]	Kingsbury, Taylor [43]	Picard, Bradley [53]	Bradley [49]	Mealings, Buchholz <i>et al.</i> [60]	Maria Menezes [59]
1,38	0,40 – 0,45	0,40 – 0,80	0,40 – 0,90	0,70	0,60 – 0,70	0,9 – 1,00

5.4.2. RUÍDO DE ATIVIDADE

5.4.2.1. Introdução

De maneira a entender a influência de cada tipo de ruído no funcionamento da sala polivalente e refeitório, os ensaios de medição dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo, L_{eq} , e do correspondente L_{Aeq} , com a ponderação do filtro A, foram divididos nos seguintes cenários

- C1 - Turma de 1 – 2 anos – Atividades de entrada, lanche e arrumação/saída do refeitório;
- C2 – Turma de 3 – 4 anos – Atividades de lanche e arrumação/saída do refeitório;
- C3 – Ruído de fundo sem ocupação.

5.4.2.2. Atividades no interior

Os quadros 5.6 e 5.7 são apresentados os valores de L_{Aeq} , medidos por banda de frequência de 1/1 oitava, correspondentes à hora do lanche nas turmas de 1 – 2 anos e 3 – 4 anos, constituídas pela entrada no refeitório, organização de mesas e refeições, a própria refeição e a saída do espaço em estudo.

Quadro 5.6. Níveis de pressão sonora (com filtro A) do ruído de atividade para a sala polivalente e refeitório do infantário: turma de 1 – 2 anos

Turma de 1 – 2 anos		Banda de frequência (Hz)										L_{Aeq} por atividade (dB)
		31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
Atividades	Início	2,9	13,9	38	51,7	63,7	61,6	58,3	54,5	52,5	45,5	67,1
	Lanche	11,3	24,5	38,5	51	59,7	60,3	57,4	53,2	49,2	40,2	64,8
	Arrumação/Saída	11,8	20,6	35,9	51,4	61,4	65,7	59,2	53,8	48,5	36,5	68,1

Quadro 5.7. Níveis de pressão sonora (com filtro A) do ruído de atividade para a sala polivalente e refeitório do infantário: turma de 3 – 4 anos

Turma de 3 – 4 anos		Banda de frequência (Hz)										L_{Aeq} por atividade (dB)
		31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
Atividades	Lanche	16,6	17,7	41,6	52,1	66	70,2	67,1	61,4	50,7	39	73,3
	Arrumação/Saída	17,1	19,9	42,6	53,2	66,9	69,6	67,5	62	51	39,7	73,3

Através da análise do ruído ambiente durante as atividades, obtidos na medição do nível de pressão sonora, verifica-se um progressivo aumento do ruído do espaço em estudo, atingindo o pico máximo durante a saída das crianças de 3 – 4 anos do refeitório e o mínimo durante a refeição das crianças de 1 – 2 anos. Tais aspetos são justificados pela diferença no número de alunos entre as duas turmas e pela forma como as crianças reagiram à presença do autor do trabalho e do operador do equipamento, sendo que as crianças mais novas pautavam pela timidez e o silêncio durante o lanche em contraste com as mais velhas, que revelaram curiosidade e maior interação.

Quando analisados os valores dos níveis de pressão sonora, representados graficamente, nas figuras 5.18 e 5.19, por banda de frequência de oitava, é possível concluir que as baixas frequências perdem importância e são nas médias frequências e um pouco nas altas, entre os 500 e 1000 Hz, onde são atingidos os valores máximos. Os valores mais baixos relativos devem-se à absorção sonora do ar e dos elementos construtivos nessa gama das altas frequências e através da falta de sensibilidade do ouvido humano, ou ausência de tráfego automóvel significativo no caso das baixas frequências.

Ao comparar os resultados do ensaio com outros valores propostos por alguns autores e com a legislação portuguesa, no quadro 5.8, constata-se que o ruído provocado pelas crianças vai ao encontro dos limites que maioria dos autores obtiveram.

Em relação aos trabalhadores, os resultados obtidos, quando comparados com valor de ação inferior (80 dB(A)), conforme o DL 186/06, é possível concluir que as atividades realizadas pelas crianças não afetam os trabalhadores, pelo que não são de esperar medidas de proteção adicional.

Quadro 5.8. Comparação entre ruído de atividade medido e os valores medidos por outros autores

L _{Aeq} máximo medido (dB)	Crandell & Smaldino (dB) [52]	Picard, Bradley (dB) [53]	Bradley & Sato (dB) [58]	MacKenzie & Airey (dB) [50]	Shield & Dockrell (dB) [56]
65 – 73	48 – 65	51,7 - 75	49,1	49 – 85	72

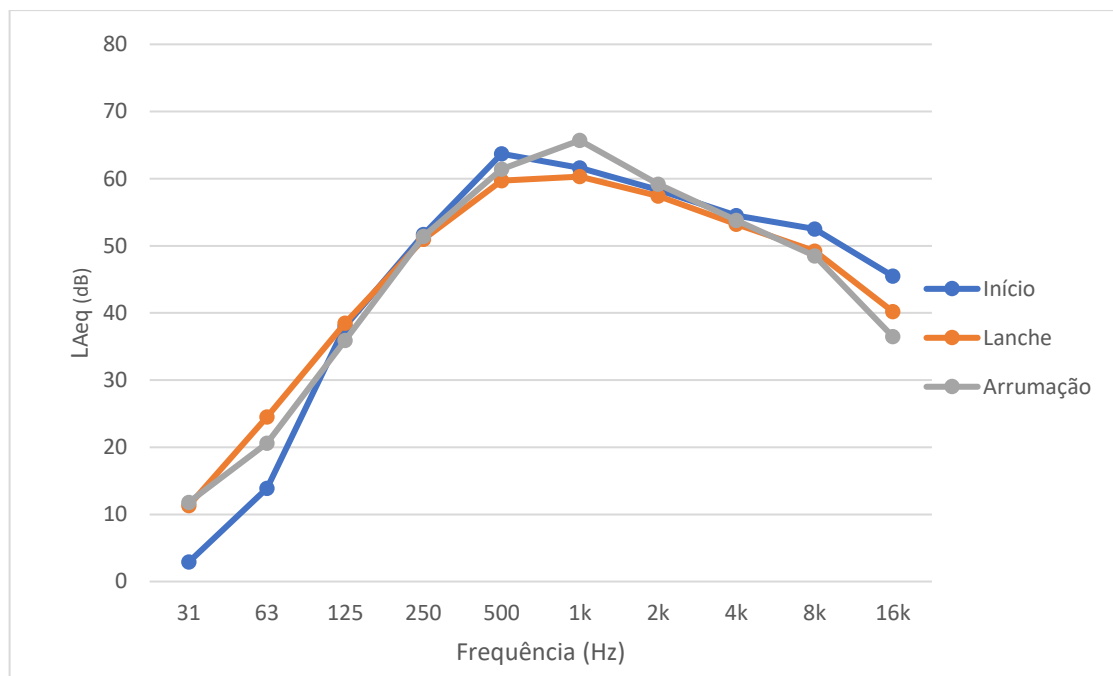


Figura. 5.18. – Nível de pressão sonora (filtro A) de ruído de atividades para a turma de 1 – 2 anos por banda de frequência de 1/1 oitava entre os 31 Hz e 16 kHz, da sala polivalente e refeitório

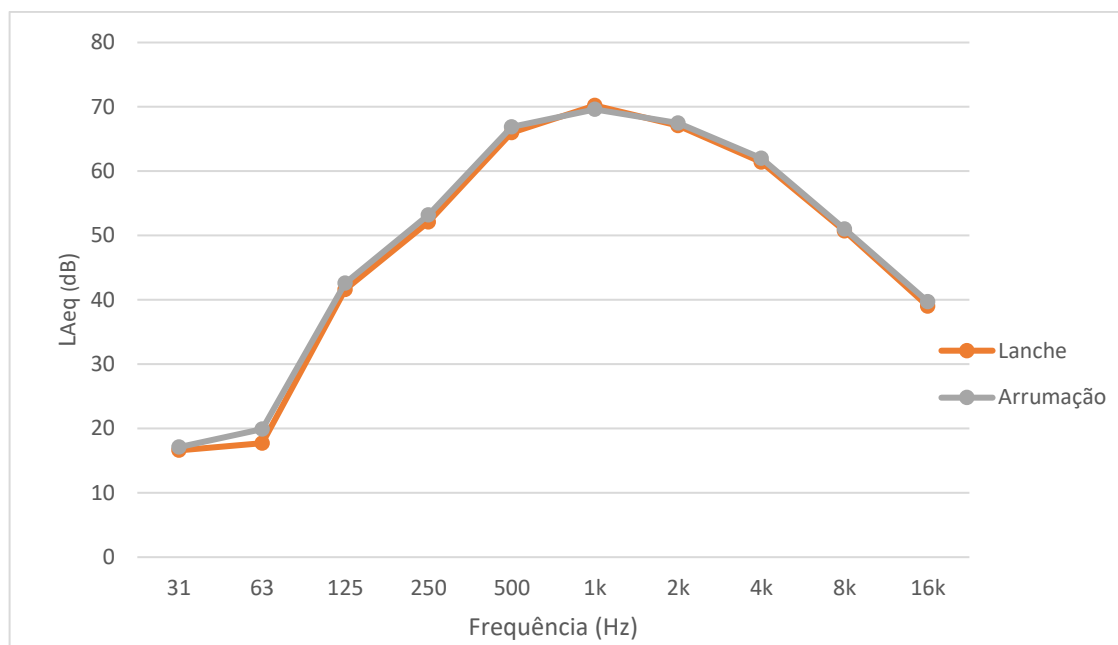


Figura. 5.19. – Nível de pressão sonora (filtro A) de ruído de atividades para a turma de 3 – 4 anos por banda de frequência de 1/1 oitava entre os 31 Hz e 16 kHz

5.4.2.3. Ruído de fundo sem ocupantes

Os resultados relativos ao ruído de fundo sem ocupação, apresentados no quadro 5.9 e figura 5.20 e verificam um decréscimo do ruído, ao longo das bandas de frequência, apesar da existência de picos nas médias e um pouco nas altas frequências, que podem ser justificados pela absorção do ar na gama das altas frequências ou pela interferência de atividades no exterior do espaço em estudo, tal como a hora do recreio. Quando comparado com outros autores, (quadro 5.10) mostra que o resultado obtido no ensaio é ligeiramente superior às restantes medições.

Quadro 5.9. Nível de pressão sonora de ruído de fundo para a sala polivalente e refeitório sem ocupação

Ruído de Fundo sem ocupação	Banda de frequência (Hz)										L _{Aeq} global (dB)
	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
L _{Aeq} (dB)	11,8	15,5	27,6	34,8	42,3	46,6	44,1	36,5	26	11,7	49,9

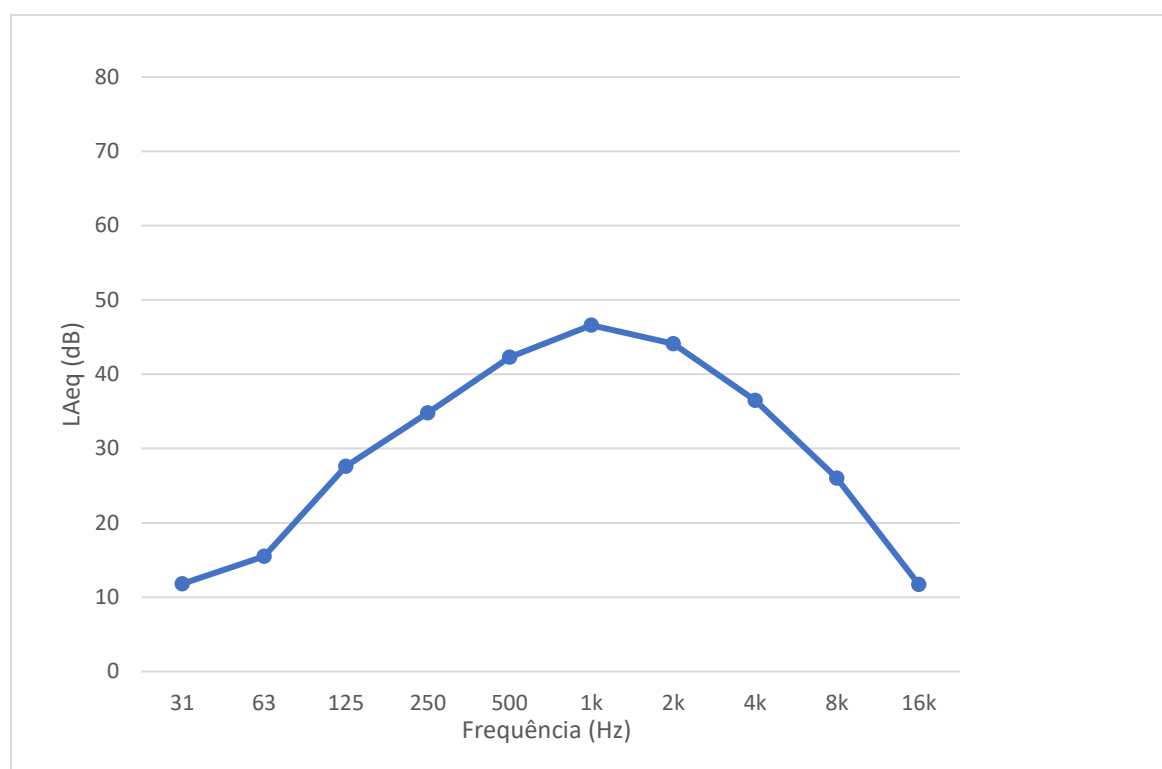


Figura. 5.20. – Nível sonoro de ruído de fundo sem ocupação por banda de frequência de 1/1 oitava entre os 31 Hz e 16 kHz

Quadro 5.10. Comparação entre ruído de fundo medido e valores medidos por outros autores

LAeq medido (dB)	Bradley (dB) [49]	Polich Segovia (dB) [51]	Bradley, Sato (2008) (dB) [58]	MacKenzie, Airey (1999) (dB) [50]	Shield, Dockrell [56]	Mealings, Buchholdz <i>et al.</i> (dB) [60]
49,9	48 – 65	49,6	42,5	44,1 – 44,7	47	36 – 45

5.4.2.4. Considerações finais

O quadro 5.11 apresenta os valores relacionados com o acréscimo de ruído provocado por cada atividade. Através dos valores corrigidos com o filtro A, constata-se que as atividades de arrumação/saída do refeitório, em ambas as turmas, apresentaram o maior acréscimo de ruído, o que é justificado pelo número de crianças a conversar, o arrastar de cadeiras, limpeza das mesas e saída do refeitório. Também foi verificado que o acréscimo de ruído foi aumentando com o passar das atividades, excetuando a fase do lanche das crianças de 1-2 anos, que revelaram alguma timidez. Apesar desse valor não estar em consonância com a tendência verificada no desenrolar das atividades, é possível concluir que o aumento do número de alunos, o tipo de atividade e a duração das mesmas são os principais fatores para o acréscimo de ruído.

Quadro 5.11. Acréscimo de ruído provocado em cada atividade na sala polivalente e refeitório

Turmas	Atividades	Ruído de atividade L_{Aeq} (dB)	Ruído de fundo L_{Aeq} (dB)	ΔL_{Aeq} (dB)
1 - 2 anos	Início	67,1	49,9	17,2
	lanche	64,8		14,9
	Arrumação / Saída	68,1		18,2
3 - 4 anos	Lanche	73,3	49,9	23,4
	Arrumação / Saída	73,3		23,4

5.4.3. RASTI

Como referido anteriormente, a avaliação do parâmetro RASTI foi efetuada através da medição de três valores ao longo de seis pontos distribuídos no espaço em estudo, da qual resulta um valor médio, sendo o resultado obtido relevante para a análise. Os valores registados durante o ensaio encontram-se no quadro 5.12 e na figura 5.21, que representa a distribuição do RASTI ao longo dos vários pontos de medição distribuídos pelo espaço.

Através dos resultados obtidos, verifica-se que o valor de RASTI diminui de forma significativa à medida que o equipamento recetor se afasta da fonte sonora, com uma variação entre 0,61 e 0,49, referentes aos valores máximo e mínimo. Na situação correspondente ao valor máximo, o recetor está situado numa zona central da sala, próxima da fonte sonora, num local aproximadamente confinado, características que provocam um aumento do número de reflexões, o que ajudam ao aumento do valor desse parâmetro. Por oposição, o local onde foi registado o menor valor de RASTI situa-se junto a uma parede lateral, no ponto mais afastado da fonte sonora e uma zona onde foram registados os valores máximos de tempo de reverberação.

Através dos resultados obtidos, verifica-se que o valor de RASTI diminui de forma significativa à medida que o equipamento recetor se afasta da fonte sonora, com uma variação entre 0,61 e 0,49, referentes aos valores máximo e mínimo. Na situação correspondente ao valor máximo, o recetor está situado numa zona central da sala, próxima da fonte sonora, num local aproximadamente confinado, características que provocam um aumento do número de reflexões, o que ajudam ao aumento do valor de RASTI. Por oposição, o local com o menor valor de RASTI situa-se junto a uma parede lateral, no ponto mais afastado da fonte sonora, zona onde foram registados os valores máximos de tempo de reverberação.

Apesar da avaliação subjetiva do RASTI indicar uma inteligibilidade da palavra “razoável”, o valor medido não possibilita a utilização total do espaço em estudo. Crianças dos 1 aos 5 anos não possuem capacidade para colmatar falhas na transmissão da mensagem, situação que é muito provável acontecer em locais com elevado TR ou ruído de fundo. Ao comparar o resultado do ensaio com os restantes valores ideais, apresentados no quadro 5.12, o caso de estudo é significativamente inferior.

Quadro 5.12. Resultados de RASTI para a sala polivalente e refeitório do infantário

Zona	Pontos de Medição	Medições			Média Ponto	Média zona	Média Sala
		1	2	3			
1/4 da sala	1	0,61	0,60	0,59	0,60	0,59	0,55
	1'	0,58	0,59	0,59	0,59		
1/2 da sala	2	0,57	0,57	0,56	0,57	0,56	
	2'	0,55	0,54	0,55	0,55		
3/4 da sala	3	0,52	0,53	0,52	0,52	0,51	
	3'	0,50	0,51	0,49	0,50		

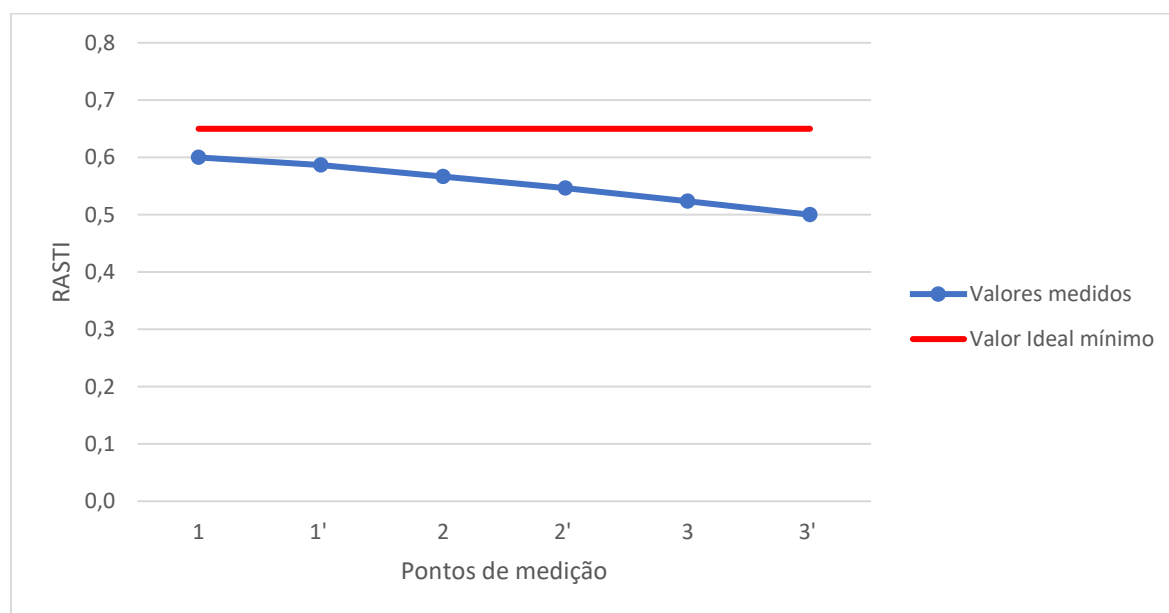


Figura. 5.21. – Valores de RASTI nos diversos pontos de medição da sala polivalente e refeitório do infantário

Quadro 5.13. Comparação entre o RASTI medido e valores os máximos medidos por outros autores

RASTI medido	Bradley [49]	Mealings, Buchholdz <i>et al.</i> [60]	Efentakis (2003) [55]	MacKenzie Airey [50]	Valor ideal
0,55	0,80	0,7 – 0,80	0,50 – 0,90	0,50 – 0,70	≥0,65

6

CORREÇÕES ACÚSTICAS

6.1. IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS

A Correção Acústica entende-se como o conjunto de medidas corretivas a aplicar no interior de espaços fechados tais como salas de aula, auditórios ou salas de concerto, de forma a obter um correto funcionamento acústico [1, 12]. As correções acústicas consistem, por exemplo, na redução do tempo de reverberação através da aplicação de revestimentos interiores e na atuação dos vários elementos dentro do espaço, que resultam numa alteração da absorção sonora e na difusão sonora. Dependendo do objetivo, reduzir ou aumentar o tempo de reverberação, os outros parâmetros acústicos (ruído de fundo e a inteligibilidade da palavra), poderão sofrer melhorias uma que vez estão diretamente ou indiretamente relacionados com os primeiros.

Relativamente ao caso em estudo, a análise realizada no capítulo 5 indica que o principal problema é o elevado de tempo de reverberação, justificados pela volumetria, pouco mobiliário de suporte e por superfícies com baixos coeficientes de absorção sonora.

No que toca ao ruído de fundo, durante as atividades e sem ocupação os valores medidos também são elevados, mas neste caso respeitam o nível de ação inferior [71], pelo que o ruído não se torna incómodo. Apesar do cumprimento dos limites máximos, os valores surgem por consequência do elevado tempo de reverberação e do tipo de atividades realizadas, que leva a um aumento do nível sonoro da voz das crianças e uma redução da inteligibilidade da palavra, por efeito conjunto da reverberação e do ruído de fundo. Apesar dos valores obtidos de RASTI não corresponderem ao cenário ideal para as crianças, as correções acústicas relativas ao tempo de reverberação vão aumentar a inteligibilidade.

6.2. PROPOSTAS DE CORREÇÃO ACÚSTICA

6.2.1. INTRODUÇÃO

Neste subcapítulo será apresentado uma análise aos parâmetros que contribuem negativamente para o mau comportamento acústico. Tendo em conta a análise, serão sugeridas algumas propostas de melhoria acústica do espaço relativo à sala polivalente e refeitório do Infantário Carolina Michaëlis, em função da estética, funcionalidade e viabilidade económica.

Antes de se proceder à apresentação das propostas, serão identificadas algumas condicionantes em relação aos elementos a aplicar.

Em relação às paredes, verifica-se que duas das faces são constituídas na maioria por vãos envidraçados, o que reduz a área disponível para possível aplicação de elemento absorvente, por outro lado alterações nos revestimentos existentes nas restantes faces, implicaria o aumento dos custos, alterações estéticas no espaço e a escolha do material seria mais criteriosa uma vez que fatores como a textura, padrão, etc. poderiam influenciar os utilizadores. Neste sentido as propostas a apresentar não se encontrarão associadas a elementos verticais.

Quanto ao pavimento é constituído por linóleo, traz vantagens ao nível da manutenção, limpeza e apresentam boas características acústicas, pelo que será igualmente descartado como área disponível para correção.

O teto do espaço a reabilitar será o elemento preferencial para base da instalação do material absorvente dado que não apresenta condicionantes de maior.

6.2.2. PROPOSTAS CORREÇÃO ACÚSTICA

Uma vez que o principal problema verificado na sala polivalente e refeitório do Infantário Carolina Michaelis se relaciona com o tempo de reverberação, as propostas de intervenção acústica serão focadas nesse parâmetro. Através da pesquisa de catálogos de várias empresas, são sugeridas 3 propostas, de filosofias diferentes de tratamento acústico para o referido espaço:

- Proposta 1 – Colocação de *Baffles*, dividida em duas configurações, por aplicação apenas no espaço correspondente ao refeitório e numa fase posterior, por aplicação na totalidade do teto;
- Proposta 2 – Aplicação de painéis absorventes na totalidade do teto;
- Proposta 3 – Solução em materiais pulverizados na totalidade do teto.

Como os resultados das medições, indicaram que os tempos de reverberação apresentam valores máximos nas médias e altas frequências (gamas importantes para a fala humana), as soluções a propor terão de apresentar um melhor desempenho na absorção dessas frequências. O quadro 6.1 apresenta os valores de tempo de reverberação, por banda de oitava, medidos no local em estudo, e a consequente área de absorção sonora (A_{atual}), obtida com base na formulação de Sabine.

Quadro 6.1. Valores de TR por banda de frequência, medido *in situ*, e a estimativa da absorção sonora existente na cantina e sala polivalente

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
A atual (m^2)	39,1	43,7	35,8	32,5	34,2	40,1
TR medido (s)	1,21	1,08	1,32	1,45	1,38	1,18

Para cada proposta a seguir apresentada, o tempo de reverberação estimado, por banda de frequência de oitava, foi obtido pela fórmula de Sabine, resultante da nova área de absorção obtida de acordo com a expressão:

$$A_{\text{Total}} = A_{\text{atual}} + A_{\text{material}} (m^2) \quad (6.1).$$

Sendo:

- A_{actual} – Área de absorção sonora existente no local em estudo (m^2);
- A_{material} – Área de absorção do material aplicado (m^2).

6.2.2.1. Proposta 1 – Absorsores suspensos

a) Configuração 1 – Colocação de *baffles* no teto do refeitório

A aplicação de *baffles* é um tipo de correção que se adapta a diferentes ambientes, com boa eficiência uma vez que tira partido de ambas as faces do material permitindo o um grande aumento da área de absorção sonora do local. Para esta configuração será avaliado o aumento de absorção sonora apenas no espaço relativo à área de refeição, de acordo com a figura 6.1, onde serão aplicados os seguintes materiais (figura 6.2):

- *Basotect*, de 40 mm de espessura;
- *Baffle SILENTIUM BT50 gross*, de 50 mm de espessura;
- *Baffle silencio 2xNVT70-30*, de 50 mm de espessura.

As principais características técnicas destes materiais encontram-se resumidas nos quadros 6.2 a 6.5.

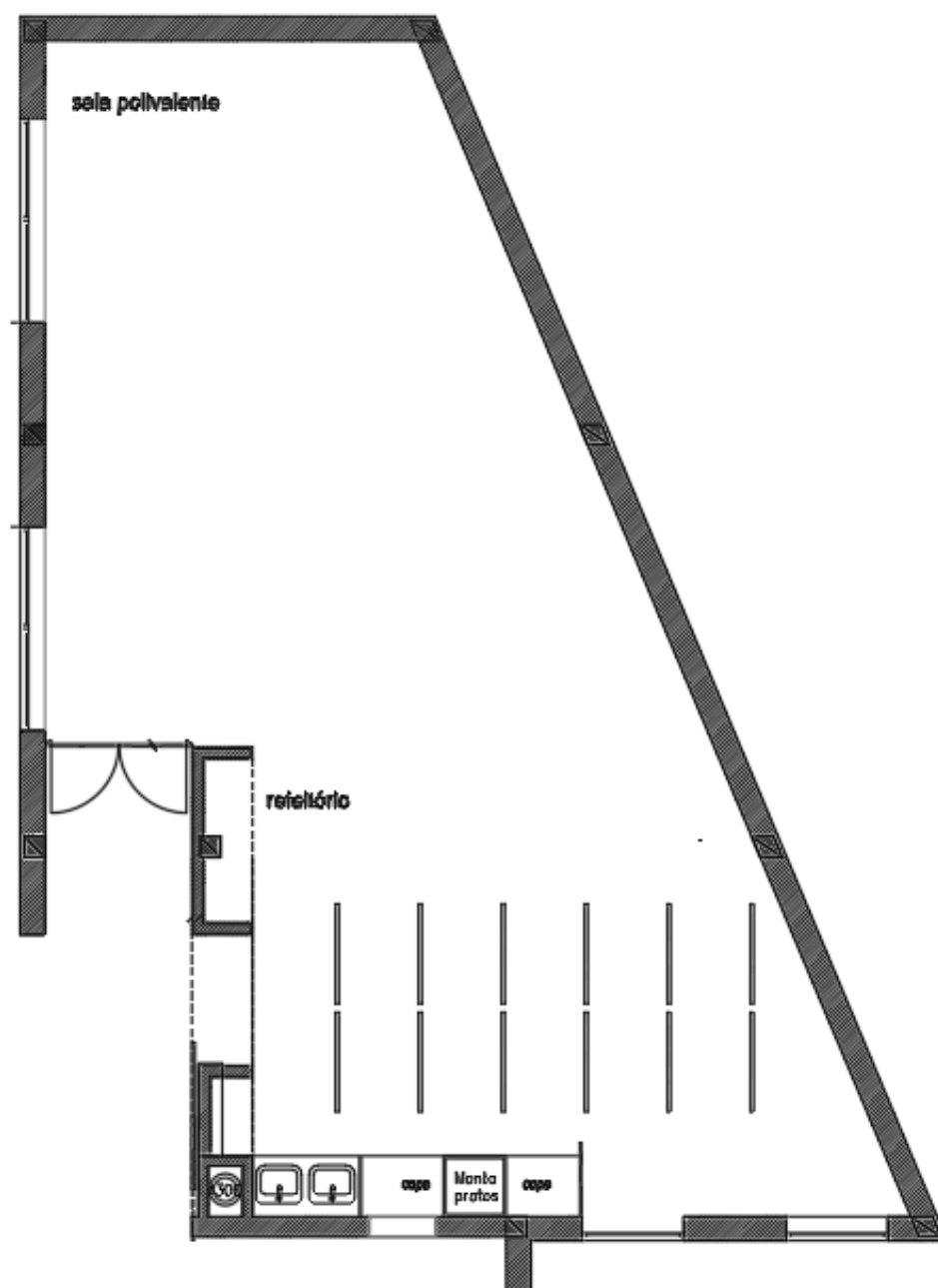


Figura. 6.1. – Esquema geral de painéis absorvedores suspensos - Configuração 1



Figura. 6.2. – Exemplos de absorsores suspensos (1 – Basotect; 2 – Silencio 2xNVT70-30; 3- SILENTIUM BT50 gross [72-74]

Quadro 6.2. Características técnicas painel acústico Basotect 40 mm [72]

Painel Acústico Basotect 40mm						
Propriedades		Valores e referências				Normas
Comportamento ao fogo		B-s1, d0				NP EN 13501
Resistência a bactérias e fungos		Sim				EN ISO 846
Condutibilidade térmica		< 0,035 W/(mK)				EN 12667
NRC		0,74				EN ISO 354
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,15	0,40	0,75	0,95	1	1

Quadro 6.3. Características técnicas painel acústico SILENTIUM BT50 gross 50 mm [75]

SILENTIUM BT50 gross			
Propriedades	Normas	Unidades	Valores e Referências
Densidade	EN ISO 845	kg / m ³	9 +2/-1
Resistência à compressão	EN ISO 3386-1	kPa	>7
Resistência à tração	ISO 1798	kPa	>120
Alongamento na rutura	ISO 1791	%	>20
Temperatura máxima de aplicação	DIN EN ISO 2578	°C	180
Comportamento ao fogo	NF O 92 -507		M1
	DIN 4102-1		B1
	DIN 5510-2		S4, ST2, SR2

	BS 476 parte 7					Classe 1
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,15	0,40	0,75	0,95	1	1

Quadro 6.4. Características técnicas painel acústico SILENTIUM 2xNV70-30 50 mm [76]

SILENTIUM 2xNV70-30						
Propriedades				Referência		
Dimensões				1200x600 mm		
Espessura				60 mm		
Cor				Negro ou branco cru		
Densidade				70 kg/ m ³		
Comportamento ao fogo				Reação ao fogo – M0		
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,30	0,20	0,32	0,45	0,55	0,42

Quadro 6.5. Resumo das principais características

Material	Dimensões (mm)	Espessura (mm)	Banda de Frequência (Hz)						Espaçamento Baffles (m)	Área de 1 baffle (m ²)
			125	250	500	1000	2000	4000		
<i>Basotect</i>	1200x600	40	0,15	0,4	0,75	0,95	1	1	1	1,44
<i>SILENTIUM BT50 gross</i>	1230x615	50	0,15	0,4	0,75	0,95	1	1	1	1,51
<i>SILENTIUM 2xNV70-30</i>	1200x600	60	0,3	0,2	0,32	0,45	0,55	0,42	1	1,44

O quadro 6.6 apresenta, para a configuração 1, os resultados relativos à nova área de absorção sonora do local em estudo, em função do material adotado, e respetivo tempo de reverberação.

Quadro 6.6. Cálculo do A_{material} e do TR de cada um dos painéis suspensos – configuração 1

Material	Nº Baffles	Área total de baffles (m²)	Parâmetro	Banda de Frequência (Hz)						TR [500 - 1k -2k Hz] previsto (s)	Melhoria de ΔTR [500 - 1k - 2k Hz] (s)
				125	250	500	1000	2000	4000		
Basotect	15	21,6	A material (m²)	3,2	8,6	16,2	20,5	21,6	21,6	0,88	0,50
			TR (s)	1,11	0,90	0,91	0,89	0,85	0,76		
21,6		A material (m²)	6,5	4,3	6,9	9,7	11,9	9,1	1,08	0,30	
		TR (s)	1,04	0,98	1,10	1,12	1,02	0,96			
SILENTIUM BT50 gross		22,7	A material (m²)	4,5	12,5	20,4	22,7	22,7	22,7	0,84	0,54
			TR (s)	1,08	0,84	0,84	0,86	0,83	0,75		

b) Configuração 2 – Colocação de baffles na totalidade do teto

Para esta configuração optou-se pela colocação dos mesmos materiais, referidos no ponto a), mas na totalidade do teto, obtendo um total de 46 baffles em todo o espaço. O quadro 6.7 apresenta os resultados relativos às novas áreas de absorção sonora e dos respetivos tempos de reverberação previstos.

Quadro 6.7. Cálculo do A_{material} e do TR de cada um dos painéis suspensos – configuração 2

Material	Nº Baffles	Área total de baffles (m²)	Parâmetro	Banda de Frequência (Hz)						TR [500 - 1k -2k Hz] previsto (s)	Melhoria de ΔTR [500 - 1k - 2k Hz] (s)
				125	250	500	1000	2000	4000		
Basotect	46	66,2	A material (m²)	9,9	26,5	49,7	62,9	66,2	66,2	0,51	0,87
			TR (s)	0,96	0,67	0,55	0,49	0,47	0,44		
Silencio (2xNVT70-30)		66,2	A material (m²)	19,9	13,2	21,2	29,8	36,4	27,8	0,75	0,63
			TR (s)	0,80	0,77	0,84	0,89	0,88	0,79		
SILENTIU M BT50 gross		68,6	A material (m²)	13,9	38,3	62,6	69,6	69,6	69,6	0,47	0,91
			TR (s)	0,89	0,58	0,48	0,46	0,45	0,43		

6.2.2.2. Proposta 2 – Painéis Absorventes

A segunda proposta para o caso em estudo consiste na aplicação de painéis absorventes na totalidade do teto, cuja área é aproximadamente de 95,2 m². Dentro da gama de materiais disponíveis, foram sugeridos os modelos *BASWaphon* e *Sonacoustic*, da marca *Stier*, que têm com objetivo de reduzir o tempo de reverberação dos espaços por aumento da área de absorção sonora.

O sistema *BASWaphon* é constituído por painéis de lã mineral de peso reduzido e colados sobre uma base, rígida ou leve, e posteriormente finalizados com uma camada de massa mineral, que permite obter uma superfície contínua e uma aparência semelhante a gesso estanhado.

Uma vez que este sistema é isento de materiais solventes, dissolventes ou aditivos, torna-se num produto compatível com o meio ambiente. No que toca à resistência ao fogo, o sistema é incombustível e encontra-se classificado como A2-s1 d0, segundo a norma EN13501-1.

Para o caso em estudo serão utilizados o sistema *BASWaphon* base sólida (figura 6.3), com as espessuras de 30, 50 e 70 mm. [78]

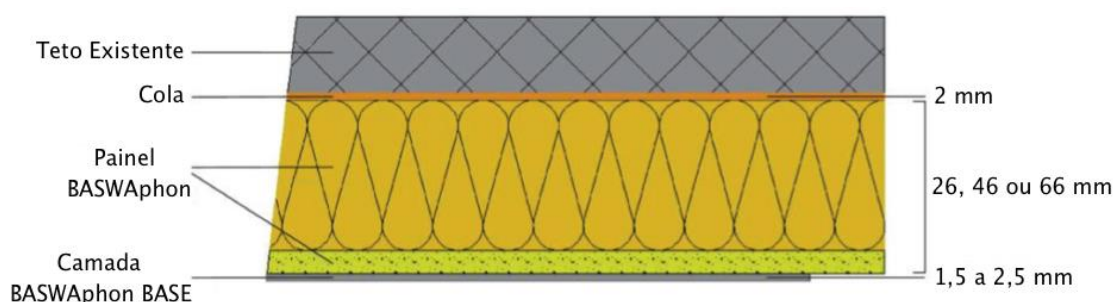


Figura. 6.3. – Esquema de revestimento acústicos *BASWaphon Base sólida* [77]

Em relação ao sistema *Sonacoustic*, este é constituído por uma base em lã mineral, que é fixa através de colagem ou mecanicamente, e por uma camada de acabamento projetada. Este tipo de produto é caracterizado também pelo bom desempenho na espessura mínima, facilidade de aplicação, compatibilidade com o meio ambiente e saúde e adaptabilidade a qualquer substrato. [79]

O quadro 6.8 apresenta os coeficientes de absorção sonora para cada tipo de solução sendo os resultados relativos à nova área de absorção sonora, por aplicação de 95,2 m² de cada material e respetivo tempo de reverberação previsto, resumidos no quadro 6.9.

Quadro 6.8. Coeficientes de absorção sonora α relativos aos revestimentos acústicos [Adaptado de 77, 78]

Material	Banda de Frequência (Hz)						NRC
	125	250	500	1000	2000	4000	
<i>BASWaphon Base Sólida</i>	0,10	0,32	0,83	0,89	0,73	0,65	0,70
	0,19	0,82	0,97	0,87	0,76	0,66	0,85
	0,28	0,95	0,98	0,83	0,72	0,61	0,85
<i>Sonacoustic</i>	0,15	0,45	0,80	0,95	0,95	0,85	0,80
	0,25	0,65	0,90	0,95	0,90	0,90	0,85
	0,40	0,80	0,95	0,95	0,90	0,90	0,90

Quadro 6.9. Cálculo do A_{material} e do TR de cada um dos revestimentos acústicos

Material	Espessura	Parâmetro	Banda de frequência (Hz)						TR [500 - 1k - 2k Hz] previsto (s)	Melhoria de ΔTR [500 - 1k - 2k Hz] (s)
			125	250	500	1000	2000	4000		
BASWAphon Base sob base sólida	30 mm	A material (m^2)	9,5	30,5	79,0	84,7	69,5	61,9	0,42	0,96
		TR (s)	0,97	0,64	0,41	0,40	0,46	0,46		
	50 mm	A material (m^2)	18,1	78,1	92,3	82,8	72,4	62,8	0,41	0,97
		TR (s)	0,83	0,39	0,37	0,41	0,44	0,46		
	70 mm	A material (m^2)	26,7	90,4	93,3	79,0	68,5	58,1	0,42	0,96
		TR (s)	0,72	0,35	0,37	0,42	0,46	0,48		
Sonacoustic	25 mm	A material (m^2)	14,3	10,6	32,5	59,0	66,2	64,3	0,56	0,82
		TR (s)	0,88	0,87	0,69	0,52	0,47	0,45		
	35 mm	A material (m^2)	23,8	61,9	85,7	90,4	85,7	85,7	0,39	0,99
		TR (s)	0,75	0,45	0,39	0,38	0,39	0,38		
	45 mm	A material (m^2)	38,1	76,2	90,4	90,4	85,7	85,7	0,38	1,00
		TR (s)	0,61	0,39	0,37	0,38	0,39	0,38		

6.2.2.3. Proposta 3 – Sistemas de celulose projetada

A última proposta baseia-se na projeção de flocos de celulose acompanhada por injeção de cola, cujo objetivo será igualmente a condução a um aumento de absorção sonora dos espaços onde é aplicado.

Este material é aplicado por projeção, permitindo uma cobertura total da área, contornando com maior facilidade eventuais reentrâncias e saliências que possam existir, possuindo ainda excelentes propriedades térmicas. No que toca à resistência ao fogo, o material encontra-se classificado como B-s2 d0, segundo a norma EN13501-1.

Este sistema pode ser aplicado sobre qualquer tipo de superfície rígida e sem a necessidade de qualquer acabamento. [79]

Para a proposta 3 serão analisados três tipos de produtos, o *SonaSpray*, através dos *tipos k13 std*, *k13 special* e o *SonaSpray fc* (figura 6.4). Os quadros 6.10 e 6.11 apresentam os valores relativos ao coeficiente de absorção sonora, por banda de frequência, e os resultados do cálculo da nova área de absorção e do tempo de reverberação, por aplicação de 95,2 m^2 de cada material, projetado na totalidade do teto.



Figura. 6.4. – Exemplos sistemas de celulose projetada (esquerda – *K13 std* meio – *K13 special* direita – *SonaSpray fc* [80])

Quadro 6.10. Coeficientes de absorção sonora α relativos aos sistemas de cellulose projetada [Adaptado de 80]

Material	Espessura (mm)	Banda de Frequência (Hz)						NRC
		125	250	500	1000	2000	4000	
<i>SonaSpray k13 std</i>	16	0,14	0,43	0,93	0,95	1,00	1,00	0,85
	25	0,20	0,55	0,95	1,00	1,00	0,95	0,90
<i>SonaSpray k13 special</i>	16	0,10	0,35	0,83	0,88	0,99	1,04	0,75
	19	0,09	0,35	0,87	0,87	1,00	1,00	0,80
	25	0,14	0,54	0,93	1,00	1,00	1,05	0,90
<i>SonaSpray fc</i>	19	0,18	0,27	0,67	1,00	1,00	1,00	0,75
	25	0,22	0,38	0,88	1,00	1,00	1,00	0,90

Quadro 6.11. Cálculo do A_{material} e do TR de cada um dos sistemas de cellulose projetada

Material	Espessura	Parâmetro	Banda de frequência (Hz)						TR [500 - 1k -2k Hz] previsto (s)	Δ TR [500 - 1k -2k Hz] (s)
			125	250	500	1000	2000	4000		
<i>k13 std</i>	16 mm	A material (m ²)	13,3	40,9	88,5	90,4	95,2	95,2	0,38	1,00
		TR (s)	0,90	0,56	0,38	0,38	0,36	0,35		
	25 mm	A material (m ²)	19,0	52,4	90,4	95,2	95,2	90,4	0,37	1,01
		TR (s)	0,81	0,49	0,37	0,37	0,36	0,36		
<i>k13 especial</i>	16 mm	A material (m ²)	9,5	33,3	82,8	82,8	95,2	95,2	0,39	0,99
		TR (s)	0,97	0,61	0,40	0,41	0,36	0,35		
	19 mm	A material (m ²)	8,6	51,4	88,5	95,2	95,2	100,0	0,37	1,01
		TR (s)	0,99	0,50	0,38	0,37	0,36	0,34		

Sonaspray fc	25 mm	A material (m ²)	13,3	51,4	88,5	95,2	95,2	100,0	0,37	1,01
		TR (s)	0,90	0,50	0,38	0,37	0,36	0,34		
	19 mm	A material (m ²)	17,1	25,7	63,8	95,2	95,2	95,2	0,40	0,98
		TR (s)	0,84	0,68	0,47	0,37	0,36	0,35		
	25 mm	A material (m ²)	20,9	36,2	83,8	95,2	95,2	95,2	0,38	1,00
		TR (s)	0,79	0,59	0,39	0,37	0,36	0,35		

6.3. ANÁLISE ECONÓMICA DAS PROPOSTAS

Dado vasto leque de opções no que respeita a soluções de reabilitação para o espaço em estudo, este subcapítulo tem como objetivo sintetizar as propostas mais vantajosas a nível de conforto acústico e proceder à análise económica de cada uma das soluções selecionadas.

As alternativas acusticamente mais adequadas serão resultado da análise dos tempos de reverberação estimados anteriormente. As figuras 6.5, 6.6 e 6.7 representam graficamente os tempos de reverberação estimados, por banda de frequência, em função de cada proposta.

Pela análise de cada alternativa, é possível verificar melhorias em relação às condições existentes, principalmente nas propostas 2 e 3, onde a maioria das alternativas apresenta valores de tempos de reverberação claramente abaixo da curva representante das condições atuais, sendo inclusive inferiores ao valor ideal definido pelo autor.

É de salientar que as alternativas da proposta 1, relativas à aplicação de *baffles* apenas na área correspondente ao refeitório, obtiveram tempos de reverberação acima do valor ideal (0,5 s), pelo que ficam excluídos da análise económica.

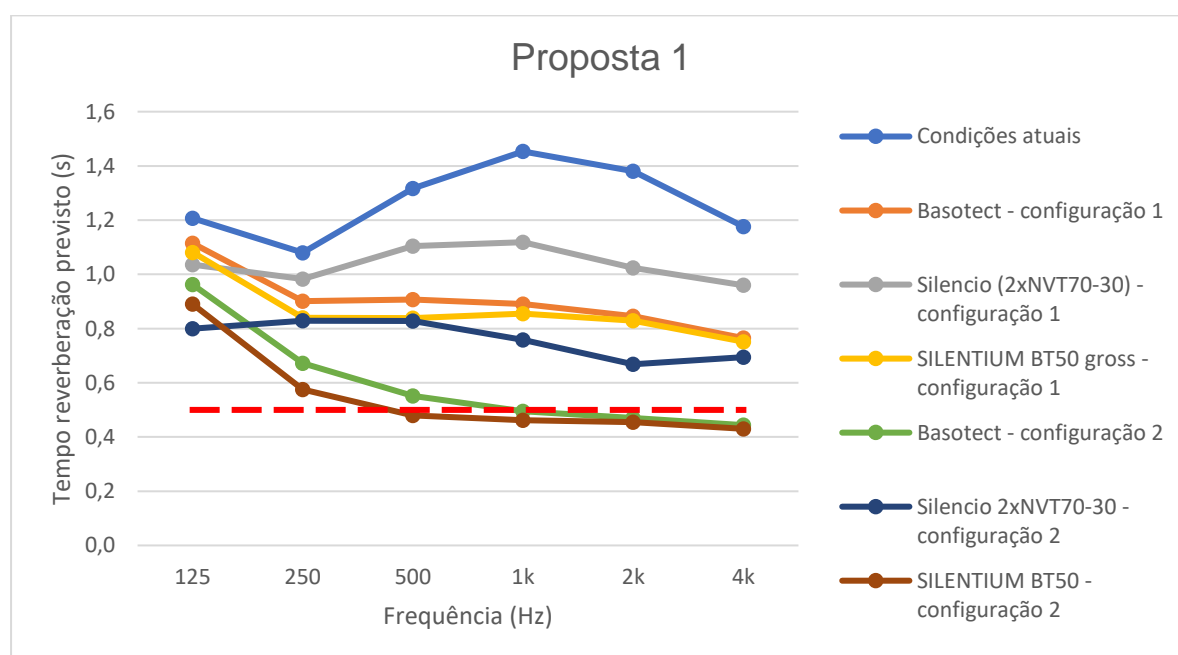


Figura. 6.5. – Valores de TR previstos por aplicação de painéis suspensos

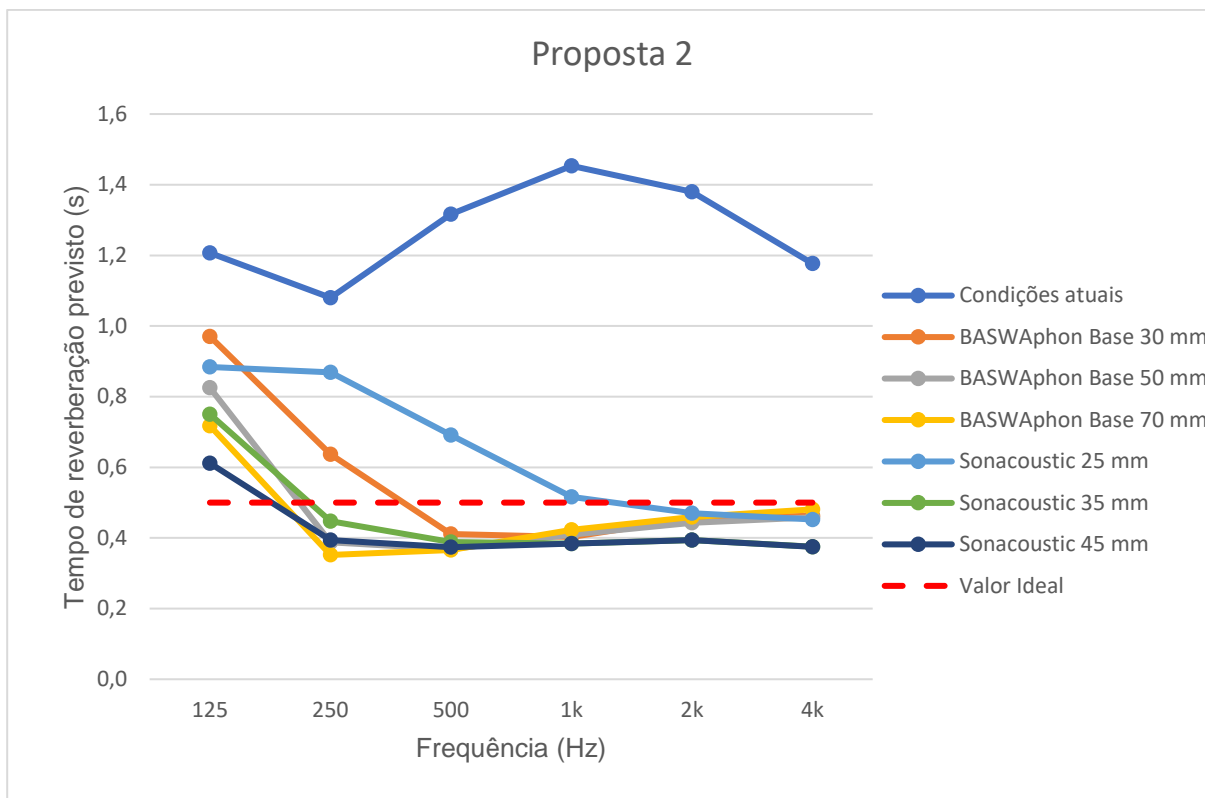


Figura. 6.6. – Valores de TR previstos por aplicação de revestimentos na totalidade do teto

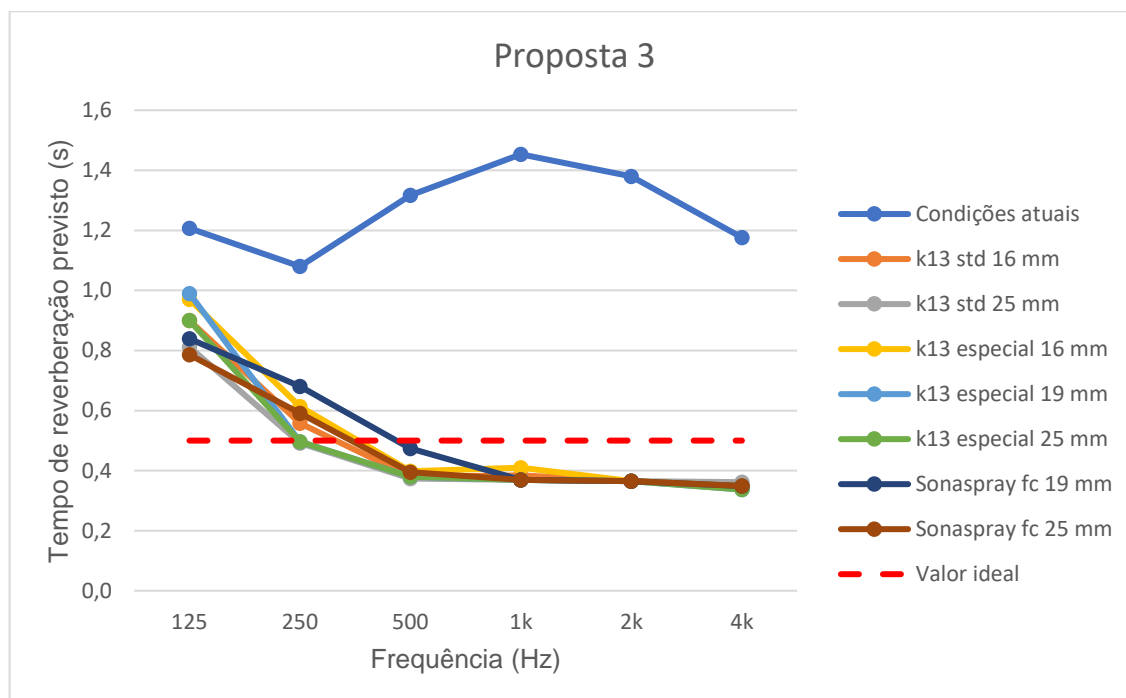


Figura. 6.7. – Valores de TR previstos por aplicação de sistemas de celulose projetada

Os quadros 6.12 a 6.14 apresentam os custos relativos à aplicação de cada proposta.

No que toca à Proposta 1 - configuração 2 é possível verificar que a alternativa *Basotect* apresenta o menor custo, quando comparado com as restantes hipóteses e ainda valores de tempo de reverberação, mas próximos do considerado ideal.

Quadro 6.12. Custo da aplicação de painéis suspensos na sala polivalente e refeitório

Material	Espessura (mm)	Nº Baffles	TR previsto (s)	Δ TR (s)	Custo aproximado material (€/m ²)	Custo Total aproximado (€)
Basotect	40	46	0,51	0,87	22	1460
<i>Silencio 2xNVT70-30</i>	50		0,87	0,51	30	1990
<i>SILENTIUM BT50 gross</i>	50		0,47	0,91	30	2090

Sobre as soluções em lã mineral constata-se, a partir do quadro 6.13, que todas as alternativas conduzem a custos superiores quando comparadas com as restantes propostas, no entanto são aquelas que conduzem a menores tempos de reverberação.

As alternativas em *BASWAphon* apresentam vantagens ao nível da estética dado o acabamento final que possibilitam, no entanto para um nível de desempenho equivalente ao painel *Sonacoustic* 35mm requer um maior investimento e uma solução de maior espessura (50mm). Dado que os painéis *Sonacoustic* tendem para valores de tempo de reverberação mais ligeiramente mais baixos a um menor custo, comparativamente às alternativas em *BASWAphon*, conclui-se que a solução por painéis *Sonacoustic* de 35 mm, representa a opção mais económica.

Quadro 6.13. Custo da aplicação de revestimentos *BASWAphon* e *Sonacoustic* no teto da sala polivalente e refeitório

Material	Espessura (mm)	TR previsto (s)	Δ TR (s)	Área (m ²)	Custo aproximado (€/m ²)	Custo Total aproximado (€)
<i>BASWAphon Base sob base sólida</i>	30	0,42	0,96		105	10000
	50	0,41	0,97		115	10950
	70	0,42	0,96		135	12860
Sonacoustic	25	0,56	0,82		85	8100
	35	0,39	0,99		90	8570
	45	0,38	1,00		93	8860

Em relação ao uso de sistemas de celulose projetada, todas as alternativas apresentam os valores mais baixos de tempo de reverberação aos menores custos possíveis, quando comparados com as outras propostas descritas anteriormente. Para esta solução, a utilização de *Sonasyray kl3 std*, de 16 mm de espessura, é a alternativa mais económica.

Quadro 6.14. Custo da aplicação de sistemas de celulose projetada *SonaSpray* no teto da sala polivalente e refeitório

Material	Espessura (mm)	TR previsto (s)	ΔTR (s)	Custo aproximado (€/m ²)	Custo Total aproximado (€)
<i>SonaSpray k13 std</i>	16	0,38	1,00	23	2200
	25	0,37	1,01	26	2480
<i>SonaSpray k13 special</i>	16	0,39	0,99	25	2380
	19	0,37	1,01	26	2480
	25	0,37	1,01	28	2670
<i>SonaSpray fc</i>	19	0,4	0,98	35	3340
	25	0,38	1,00	38	3620

6.4. CONCLUSÃO

O quadro 6.15 apresenta o resumo das alternativas mais económicas, representando uma diferente filosofia de resolução do mesmo problema - redução do tempo de reverberação -, onde são comparados os custos totais de aplicação, os ganhos de TR e o efeito do acréscimo de absorção (expressão 6.1), onde A_1 e A_0 representam a área de absorção sonora antes e depois do tratamento acústico [1]:

$$\Delta L_A = 10 * \log \frac{A_1}{A_0} \text{ (dB)} \quad (6.2).$$

Quadro 6.15. Avaliação do custo da aplicação de sistemas de celulose projetada *SonaSpray* no teto da sala polivalente e refeitório

Solução	Espessura (mm)	TR previsto (s)	ΔTR (s)	Preço aproximado (€/m ²)	Custo Total aproximado (€)	ΔL_A previsto (dB)
<i>Basotect</i>	40	0,51	0,9	22	1460	4,3
<i>Sonacoustic</i>	35	0,39	1,0	90	8570	5,5
<i>SonaSpray k13 std</i>	16	0,38	1,0	23	2200	5,6

Através da análise do quadro é possível verificar que todas as soluções apresentam ganhos consideráveis ao nível do tempo de reverberação, principalmente as alternativas *Sonacoustic* e *SonaSpray*, que obtiveram valores dentro dos limites estabelecidos pelo autor (0,4 a 0,6 s). Em relação aos *baffles Basotect*, este apresentou o valor mais próximo do ideal, o que permite concluir que todas as soluções são adequadas para o uso da palavra, característica mais importante para a sala polivalente e refeitório.

Relativamente ao custo, a aplicação de *baffles* da *Basotect* é, em teoria, a solução mais económica pois apresenta o menor custo aproximado (1460 €). No que toca às soluções de *Sonacoustic* e *SonaSpray k13 std*, os custos totais são superiores, que são justificados pela maior área de absorção, pelo tipo de aplicação e acabamentos.

Acerca das características, a colocação de *baffles* ao longo do teto envolve uma mudança drástica na estética, pelo que não deve ser necessário dada as dimensões do espaço. A solução *Sonacoustic* apresenta um acabamento semelhante ao reboco liso, semelhante às condições existentes, é de fácil instalação, adequado a qualquer tipo de superfície pode ser aplicado a espaços como escolas, hospitais, igrejas ou restaurantes, mas é de todas as propostas aquela com maior custo [79]. Em relação ao *SonaSpray k13 std*, este tipo de material é adequado para espaços como ginásios, hangares, aeroportos ou outros tipos de espaços com pé-direito elevado e pode ser aplicado sobre qualquer tipo de superfícies, tendo como acabamento, uma textura “tipo alcatifa” [80].

Em suma, apesar do menor custo dos *baffles Basotect* e do tipo de acabamentos e adequabilidade dos painéis *Sonacoustic*, a alternativa composta por um sistema de celulose projetada numa área de 95,2 m² de teto, por painéis *SonaSpray K13 std* de 16 mm é a melhor solução, pois apresenta os maiores ganhos relativos a tempo de reverberação e o preço mais competitivo.

7

CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como intuito a caracterização acústica de infantários, tendo como exemplo, a Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michêlis, onde foi analisado o espaço relativo à sala polivalente e refeitório. Tendo em conta a informação fornecida pelos responsáveis da Instituição, foram estudados os seguintes parâmetros acústicos:

- Tempo de reverberação;
- Ruído de fundo e das atividades realizadas, através do parâmetro L_{Aeq} ;
- Inteligibilidade da palavra, analisado pelo RASTI.

O valor médio de TR de 1,38 s é superior aos limites definidos no RRAE, consequência de um espaço amplo, grande volume e com ausência de mobiliário de apoio. Tendo em conta os valores definidos pelo autor, os resultados das medições são muito superiores aos valores ideais para espaços destinados a crianças entre os 1 – 5 anos (0,4 a 0,6 s).

Em relação ao ruído de fundo e de atividade, os valores acabam por ser elevados, que se torna evidente pelas diferenças até 23,4 dB(A) entre a atividade mais ruidosa (lanche da turma de 3 – 4 anos) e o ruído de fundo. No entanto, os valores medidos encontram-se abaixo do nível de ação inferior, pelo que não devem ser esperadas medidas de proteção extra para os educadores.

Relativamente ao RASTI, verificou-se um decréscimo de inteligibilidade à medida que o recetor se afastava da fonte sonora, atingindo um valor mínimo de 0,51 no ponto mais afastado do espaço, o que corresponde a uma classificação subjetiva de “razoável”, que se encontra abaixo do mínimo definido pelo autor (0,65). No entanto, é de esperar que a inteligibilidade da palavra melhore significativamente através da redução do tempo de reverberação.

Com base nas medições *in situ*, foi possível concluir que o caso em estudo não apresentou condições acústicas adequadas para o tipo de funções destinadas, principalmente para atividades de ensino, sendo determinado o tempo de reverberação o principal problema do espaço em causa. Uma vez definido o problema foram sugeridos um conjunto de soluções com o objetivo de melhorar as condições acústicas do espaço, sendo constituídas por três diferentes filosofias de aplicação:

- Proposta 1 – Solução em “teto suspenso” (*Baffles*);
- Proposta 2 – Aplicação de painéis de lã mineral na totalidade do teto;
- Proposta 3 – Solução em materiais pulverizados na totalidade do teto.

Para o caso de estudo foi proposto uma solução constituída por painéis *SonaSpray K13 std* de 16 mm de espessura a aplicar a uma área de 95,2 m² de teto, correspondendo a um custo aproximado de 2200 €. Com esta alternativa estima-se uma redução do tempo de reverberação de 1 s e do ruído de fundo em 5,6 dB(A), o que leva a uma melhoria da inteligibilidade da palavra.

No quadro 7.1 são apresentados os valores dos parâmetros acústicos medidos atualmente e os resultados obtidos por aplicação da solução proposta.

Quadro 7.1. Comparação entre os parâmetros acústicos medidos e os previstos após aplicação da solução proposta

Parâmetro	Valores Ideais	Sala polivalente e refeitório (Infantário Carolina Michaelis)	
		Medidos	Previstos
TR [500, 1k, 2k Hz] (s)	0,4 – 0,6	1,38	0,38
Ruído de fundo LAeq (dB)	≤ 40	50	45
Ruído de Atividade LAeq (dB)	-	73,3	-
RASTI	≥ 0,65	0,55	> 0,75

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como comentário final, são sugeridas algumas medidas adicionais, interessantes sob o ponto de vista do atual e em futuros trabalhos relacionados com a Acústica de infantários e outros espaços escolares.

De forma a melhorar o presente trabalho, seria pertinente um maior desenvolvimento dos seguintes aspetos:

- Estudo mais detalhado da influência do ruído de fundo, através da medição dos níveis de fundo das várias atividades desenvolvidas ao longo de vários dias, quer no interior e exterior do caso de estudo;
- Avaliação relativamente ao isolamento sonoro a ruídos de condução área de percussão para uma melhor caracterização acústica do espaço em estudo;
- Realização de questionários relativos às condições atuais do espaço a todo o pessoal afeto à Instituição;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P. *O Acústica Ambiental e de Edifícios*, Edição 8.16, FEUP, Porto, 2016
- [2] *Propagação do som*, <http://www.fq.pt/som/33-propagacao-do-som> , acedido em 9/2/2017
- [3] *A Natureza do Som* http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/natureza_som.html , acedido em 9/2/2017
- [4] *Creating a 3D Mix with Two Speakers* <https://ask.audio/articles/creating-a-3d-mix-with-two-speakers> , acedido em 10/2/2017
- [5] Oliveira, P. *Desenvolvimento e Caracterização de Elementos Autoportantes para Absorção Sonora em Espaços tipo Open Space*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009
- [6] Figueiredo, J. *Caracterização do Conforto Acústico em Escolas*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009
- [7] *Spectral Analysis of Sound* <http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/spectral.html> , acedido em 18/2/2017
- [8] Silva, C. *O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2013
- [9] *O Som e a Luz* http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html , acedido em 19/2/2017
- [10] Pereira, C. *Caracterização Acústica de Grandes Centros Comerciais*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2015
- [11] *Acústica, O Ruído II. Transmissão I* http://www.solerpalau.pt/formacion_01_24.html , acedido em 20/2/2017
- [12] Mateus, D. *Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído*, Coimbra, 2008
- [13] *Isolação e Absorção* http://chracustica.zip.net/arch2008-08-24_2008-08-30.html , acedido em 21/2/2017
- [14] *Tratamento Acústico de ambientes: algumas noções*. <http://blog.santoangelo.com.br/tratamento-acustico-de-ambientes-algumas-nocoas/> , acedido em 21/2/2017
- [15] *Wallace Clement Sabine* https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine , acedido em 22/2/2017
- [16] *Aglomerado de Cortiça Expandida* <http://isocor.pai.pt/ms/ms/isocor-aglomerados-de-cortica-aceprodutos-de-cortica-1050-012-lisboa/ms-90047830-p-3/> , acedido em 23/2/2017
- [17] *Hardboard Standart* <http://aguedaplaca.com/website/pt/produtos/hardboard/standard> , acedido em 23/2/2017
- [18] *Lã de Rocha* <http://www.sotecnisol.pt/materiais/produtos/solucoes-de-impermeabilizacao-isolamentos-e-drenagens/isolamentos-termicos/la-de-rocha/> , acedido em 23/2/2017
- [19] *Absorsores sonoros* <http://acustica.castelhano-ferreira.pt/absorsores-sonoros/> , acedido em 23/2/2017

- [20] *Painel Acústico Perfurado* <http://www.speeddry.com.br/painel-acustico-perfurado> , acedido em 23/2/2017
- [21] *Bloco Isolsónico* http://www.mendesrodrigues.pt/product/details/55/bloco_isolsonico , acedido em 23/2/2017
- [22] *Acústica e Isolamento Sonoro de Edifícios* <https://www.engenhariacivil.com/acustica-isolamento-sonoro-edificios> , acedido em 25/2/2017
- [23] *Cumplimiento del CTE* http://www.corbalan.com/Productos/CTE/cumplimiento_CTE.html , acedido em 27/2/2017
- [24] Carvalho, V., *Ruídos de Percussão em Salas de Aula*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2015
- [25] *Interação do Som com os Materiais* http://ctborracha.com/?page_id=1667 , acedido em 27/2/2017
- [26] *Sons Aéreos e de Percussão* <http://www.imperialum.com/?solucoes=sons-aereos-e-de-percussao> , acedido em 27/2/2017
- [27] *Soalho Flutuante* <http://www.rockwool.pt/produtos+e+solu%C3%A7%C3%B5es/u/2011.construction/3173/forjamentos/e+m-contacto-com-o-terreno/soalho-flutuante> , acedido em 28/2/2017
- [28] Kuttruff, Heinrich, *Room acoustics*, Spoon Press, Fourth Edition, Londres, 2000
- [29] Pinto, M., *Caracterização Acústica de Grandes Auditórios*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012
- [30] *Introducing Speech Intelligibility* <http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/NTi-Audio-AppNote-AL1-Introducing-STIPA.pdf> , acedido em 4/3/2017
- [31] *Time delay between the direct sound and the first reflection* https://www.cs.sfu.ca/~tamaras/delayEffects/Time_delay.html , acedido em 6/3/2017
- [32] *Royal Albert Hall* https://en.wikipedia.org/wiki/Royal_Albert_Hall , acedido em 7/3/2017
- [33] *Concha acústica* https://pt.wikipedia.org/wiki/Concha_ac%C3%Bastica , acedido em 8/3/2017
- [34] *Lombard Effect* https://en.wikipedia.org/wiki/Lombard_effect , acedido em 29/5/17
- [35] Hartman, G. *The effects of noise on children* J. Educational Psychology, EUA, março 1946
- [36] French, N.R., Steinberg, J.C., *Factors governing the intelligibility of speech sounds*, J. Acoustical Society of America, EUA, janeiro 1947
- [37] ANSI/ASA S3.5 – American National Standard Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index. Acoustical Society of America, 1997
- [38] Bolt, R. H., MacDonald, A. D, *Theory of speech masking by reverberation*, J. Acoustical Society of America, volume 21, nº 6, EUA, novembro 1949
- [39] Beranek, L. L., *Acoustic Measurements*, John Wiley & Sons, Nova Iorque, EUA, março 1949
- [40] Beranek, L. L., *Acoustics*, Acoustic Society of America, Nova Iorque, EUA, 1954
- [41] Korn, T. S., *Effect of psychological feedback on conversational noise reduction in rooms*, J. Acoustical Society of America, EUA, Abril 1954

- [42] Fitzroy, D., Reid, J., *Acoustical environment of school buildings*, Education Facilities Labs, Nova Iorque, EUA, 1963
- [43] Kingsbury, H.F., Taylor, D. W., *Design Guidelines for good hearing conditions and effective noise control in school classrooms*, Departamento de saúde, educação e bem-estar dos EUA, contrato nº OEC -7-068869-0261, Pensilvânia, EUA, 1967
- [44] Kingsbury, H.F., Strumpf, F. M., *The development and testing of guidelines for designing school classrooms to maximize hearing conditions provide for effective noise control*, ERIC Microfiche ED 018 076, Pensilvânia, EUA, 1969
- [45] Crum, D., *The effects of noise, reverberation and speaker-to-listener distance on speech understanding*, dissertação de doutoramento não publicada, Universidade Northwestern, Evanston, EUA, 1974
- [46] Gelfand, S. A., Silman, S., *Effects of small room reverberation upon the recognition of some consonant features*, J. Acoustical Society of America, volume 66, nº1, EUA, 1979
- [47] Houtgast, T., *The effect of ambiente noise on speech intelligibility in classroms*, Applied Acoustics, volume 14, nº1, EUA, 1981
- [48] Crandell, C., Bess, F., *Speech recognition of children in a “typical” classroom setting* American Journal of Audiology, volume 1, EUA, 1986
- [49] Bradley, J. S, *Speech Intelligibility in Classrooms*, J. Acoustical Society of America, volume 80, nº3, Ottawa, Canadá, 1986
- [50] MacKenzie, D. J., Airey, S., *Speech intelligibility in classrooms*, Universidade Heriot-Watt, Edimburgo, Escócia, Reino Unido, 1999
- [51] Polich, L., Segovia, R. S., *Acoustic conditions in classrooms for the hearing impaired in Nicaragua*, J. of the Academy of Rehabilitative Audiology, volume 32, EUA, 1999
- [52] Crandell, C. C., Smaldino, J. J., *Classroom acoustics for children with normal hearing and with hearing impairment*, J. Acoustical Society of America, EUA, outubro 2000
- [53] Picard, M., Bradley, J. S., *Revisiting speech interference in classrooms*, NRC Institute for Research in Construction, volume 40, Canadá, 2001
- [54] Knecht, H.A, *et al.*, *Background noise levels and reverberation times in unoccupied classrooms: Predictions and measurements*, American Journal of Audiology, volume. 11, no. 2, pag. 65–71, 2002
- [55] Efentakis, A. *et al.* *Noise and Acoustics Surveys of London Primary Schools*. Euronoise, Nápoles, 2003
- [56] Shield, Bridget, Dockrell, D. *The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children*. J. Acoustical Society of America, 123, nº(1, pag. 133-144, 2004
- [57] Smyrnova, Y. *A procedure to improve acoustical conditions in classrooms*, Euronoise, Tampere, Finlândia, 2006
- [58] Sato, H, Bradley, J.S., *Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms*, J. Acoustical Society of America, volume 123, nº 4, pag.2064-2077, 2008

- [59] Menezes, M. I., *Caracterização acústica interior de edifícios escolares reabilitados – O caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas*, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010
- [60] Mealings, K. T. et al., *An assessment of different sized open plan and enclosed kindergarten classroom listening environments*, Acoustics 2015 conference, The Hunter Valley, Austrália, 2015
- [61] *Principal Legislação sobre Acústica*, <http://www.spacustica.pt/portuguese/texto/legislacao.html>, acedido em 7/4/2017
- [62] *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de junho, Diário da República, 2008
- [63] BB 93, *Acoustic Design of Schools: Building Bulletin 93*, 2003
- [64] *Classroom Acoustics* – Technical Committee on Architecture of the acoustical society of America, EUA, agosto 2000
- [65] *ANSI S12.60 – Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*. Acoustical Society of America, 2010
- [66] *Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement*, 2003
- [67] *Infantário Carolina Michaëlis*, <https://www.google.pt/maps/@41.1593781,-8.6231365,580m/data=!3m1!1e3> acedido em 6/6/2017
- [68] *Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis* <http://aijicm.weebly.com/associaccedilatildeo.html>, acedido em 18/4/2017
- [69] Paulo Vasconcelos, *Comunicação privada (email e no local em estudo)*, 22/02/2017
- [70] EN ISO 3382:1997, *Acoustics. Measurement of the reverberation of rooms regarding other acoustical parameters*
- [71] *Regulamento Geral do Ruído*. Decreto-lei 09/2007 de 17 de janeiro
- [72] Catálogo comercial da Basotect, 2008
- [73] *silencio 2xNVT70-30* <http://www.silencio.pt/catalogo/detail/id/20/>, acedido em 10/6/2017
- [74] *Baffle SILENTIUM BT50 gross* <http://www.silencio.pt/catalogo/detail/id/70/>, acedido em 16/6/2017
- [75] Catálogo comercial do produto SILENTIUM BT50, empresa Silencio, 2017
- [76] Catálogo comercial do produto 2xNVT70-30, empresa Silencio, 2017
- [77] Catálogo comercial do produto BASWAphon, empresa S.T.I.E.R, 2017
- [78] Catálogo comercial do produto Sonacoustic, empresa S.T.I.E.R, 2017
- [79] Catálogo comercial do produto Sonaspray, empresa S.T.I.E.R, 2017
- [80] Cruz, M., *Igrejas modernas com problemas acústicos O caso da Igreja da Nossa Senhora da Conceição*, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011